



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE  
E INDUSTRIALE**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**Studio numerico della dispersione di effluenti tossici  
derivanti da incendi di depositi di rifiuti**

***Relatore: Dott. Ing. Chiara Vianello***

***Correlatore: Ing. Paolo Mocellin***

***Laureando: Paolo Brigante***

**ANNO ACCADEMICO 2018 - 2019**



# Riassunto

Nel presente lavoro si sono studiati quattro casi di incendio di materie plastiche utilizzando il software FDS (*Fire Dynamics Simulator*). Con il software si è modellata la combustione del PP, del PE e del PET, con l'obiettivo di indagare le concentrazioni delle specie che si sviluppano durante l'incendio di alcune pile di plastica compattate. Con FDS sono state inoltre ricavate alcune caratteristiche della reazione di combustione, come la curva  $HRR(t)$ , il *Burning rate* e il calore irradiato dall'incendio per ognuno degli scenari considerati.

I dati ottenuti con FDS sono stati successivamente elaborati ed inseriti nel software Aloft-PC, in modo da studiare la dispersione nell'atmosfera delle specie prodotte. Si è studiato l'andamento delle concentrazioni dei prodotti di combustione nella direzione sottovento per una distanza di 5km.



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>9</b>
<b>Capitolo 1.....</b>	<b>13</b>
<b>Il ciclo e i numeri dei rifiuti in Italia .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Produzione al livello nazionale e direttiva comunitaria.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Percentuale raccolta differenziata in Italia .....</b>	<b>16</b>
1.2.1 <i>Composizione dei rifiuti urbani .....</i>	<i>17</i>
<b>1.3 Il riciclo e il recupero della Plastica .....</b>	<b>18</b>
1.3.1 <i>Separazione e compattazione della plastica .....</i>	<i>19</i>
1.3.2 <i>Riciclo meccanico omogeneo o rilavorazione .....</i>	<i>22</i>
1.3.3 <i>Riciclo meccanico eterogeneo o trasformazione .....</i>	<i>22</i>
1.3.4 <i>Riciclo chimico o depolimerizzazione .....</i>	<i>22</i>
1.3.5 <i>Recupero energetico o termovalorizzazione .....</i>	<i>23</i>
<b>1.4 Il riciclo e il recupero della Plastica .....</b>	<b>24</b>
<b>Capitolo 2.....</b>	<b>27</b>
<b>Il fenomeno degli incendi di rifiuti .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Eventi significativi sul territorio nazionale .....</b>	<b>27</b>
2.1.1 <i>Distribuzione sul territorio nazionale .....</i>	<i>27</i>
2.1.2 <i>Cause dell'aumento degli incendi .....</i>	<i>31</i>
<b>2.2 Gli stoccaggi di rifiuti.....</b>	<b>31</b>
2.2.1 <i>Le nuove Linee Guida per la gestione operativa degli stoccaggi .....</i>	<i>32</i>
<b>Capitolo 3.....</b>	<b>37</b>
<b>Incendio di materie plastiche .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 La combustione.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 <i>Tipologie di combustibili e triangolo del fuoco .....</i>	<i>37</i>
3.1.2 <i>La combustione completa ed incompleta .....</i>	<i>37</i>
<b>3.2 Materiali plastici .....</b>	<b>38</b>
3.2.1 <i>Polietilene (PE) .....</i>	<i>38</i>
3.2.2 <i>Polipropilene (PP) .....</i>	<i>40</i>
3.2.3 <i>Polietilentereftalato (PET) .....</i>	<i>41</i>
<b>3.3 Prodotti della combustione .....</b>	<b>43</b>

3.3.1	<i>Le Diossine</i> .....	44
3.3.2	<i>Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)</i> .....	46
<b>3.4</b>	<b>Monitoraggio ambientale</b> .....	48
3.4.1	<i>Normativa di riferimento per il monitoraggio ambientale</i> .....	49
<b>Capitolo 4</b> .....		51
<b>Fire Dynamics Simulator</b> .....		51
<b>4.1</b>	<b>Fire Safety Engineering</b> .....	51
<b>4.2</b>	<b>Fire Dynamics Simulator</b> .....	52
<b>4.3</b>	<b>File input di FDS</b> .....	52
4.3.1	<i>Struttura del file</i> .....	53
<b>4.3</b>	<b>Output di FDS</b> .....	55
<b>Capitolo 5</b> .....		57
<b>Modellazione di incendi di rifiuti</b> .....		57
<b>con FDS</b> .....		57
<b>5.1</b>	<b>Costruzione del modello</b> .....	57
<b>5.2</b>	<b>Scenario 1: Incendio di una pila di plastica mista</b> .....	67
5.2.1	<i>Risultati</i> .....	67
<b>5.3</b>	<b>Scenario 2: Incendio di una pila di plastica mista</b> .....	71
5.3.1	<i>Risultati</i> .....	71
<b>5.4</b>	<b>Scenario 3: Incendio di tre pile di plastica omogenee</b> .....	75
5.4.1	<i>Risultati</i> .....	75
<b>5.5</b>	<b>Scenario 4: Incendio di tre pile di plastica omogenee</b> .....	79
5.5.1	<i>Risultati</i> .....	79
<b>5.6</b>	<b>Calore prodotto dalla combustione</b> .....	83
<b>Capitolo 6</b> .....		87
<b>Software ALOFT-PC</b> .....		87
<b>6.1</b>	<b>ALOFT-FT</b> .....	87
6.1.1	<i>Il modello matematico</i> .....	87
6.1.2	<i>Il modello numerico</i> .....	88
6.1.3	<i>Intrappolamento delle particelle</i> .....	89
6.1.4	<i>Il software</i> .....	89
6.1.5	<i>Input di Aloft</i> .....	90
<b>Capitolo 7</b> .....		93
<b>Modellazione degli scenari di Aloft-PC</b> .....		93

<b>7.1 Analisi della dispersione degli effluenti</b> .....	93
<b>7.2 Dispersione effluenti dello Scenario 1</b> .....	94
<b>7.3 Dispersione effluenti dello Scenario 2</b> .....	98
<b>7.4 Dispersione effluenti dello Scenario 3</b> .....	102
<b>7.5 Dispersione effluenti dello Scenario 4</b> .....	106
<b>Conclusioni</b> .....	111
<b>APPENDICE</b> .....	115
<b>Bibliografia</b> .....	127
<b>Indice bibliografico</b> .....	127
<b>Siti web</b> .....	128





# Introduzione

Il fenomeno degli incendi negli impianti di trattamento e smaltimento dei rifiuti, negli ultimi anni, ha assunto una considerevole dimensione a livello nazionale. Le notizie di incendi di rifiuti, di minore o maggiore gravità a seconda dei casi, di origine dolosa o colposa, riscuotono una sempre maggiore attenzione mediatica, dovuta anche alla crescente sensibilità alle ripercussioni sull'ambiente e sulla salute delle persone che essi causano.

Cresce, dunque, l'esigenza di dare una dimensione a quello che è ormai considerato un "fenomeno" nazionale; analizzarne cause, sviluppi ed esiti, sia per l'uomo che per l'ambiente, in modo da poter agire preventivamente ed essere in grado di limitarne le conseguenze quando l'incendio è già avvenuto.

La conseguenza più diretta di un incendio è lo sviluppo di calore sotto forma di fiamma: quando si pensa al fuoco vengono subito in mente le ustioni che può provocare all'uomo. Un altro aspetto da non sottovalutare è la dispersione in atmosfera degli effluenti tossici che derivano dall'incendio. Quest'ultimo può senza dubbio ritenersi tra i risvolti peggiori, se non addirittura il più pericoloso, ai fini della salute e della sicurezza delle persone, così come per l'ambiente. Per l'uomo, il danno principale dovuto alla ricaduta dei fumi tossici, è quello subito all'apparato respiratorio.

L'esposizione ai fumi può causare alle persone direttamente coinvolte nell'incendio degli effetti immediati, mentre ulteriori danni possono manifestarsi in tempi differiti anche a chi non ne è stato coinvolto in maniera diretta.

Si parla di effetti immediati riferendosi ai danni che possono occorrere alle vie aeree superiori, con ostruzione delle stesse, avvelenamento da ossido di carbonio ed inalazione polmonare di fumo. Altri tipi di complicazioni, tra cui polmonite, atelectasie (dovute proprio all'assenza di aria negli alveoli) ed embolie polmonari, sono riscontrabili anche a distanza di settimane o mesi dall'incendio.

Gli effetti sull'organismo appena descritti sono dovuti principalmente al fatto che la maggior parte dei costituenti del fumo sono dei sottoprodotti chimici, derivanti dalla combustione incompleta del materiale, alcuni dei quali altamente irritanti per le mucose delle vie respiratorie; quest'ultimi agiscono come bronco-costrittori, aumentando ulteriormente il danno polmonare vero e proprio, inoltre alcuni di essi sono stati identificati come causa

diretta di cancro. I più comuni, secondo la IARC, sono acetaldeide, benzene, acido cianidrico, ammoniaca, ossido di azoto e ossido di carbonio.

I danni ai polmoni derivano perlopiù dalla chiusura dei bronchi e dall'azione tossica sopracitata, mentre i danni causati dal calore dei fumi, grazie alla capacità delle vie aeree di raffreddare e umidificare l'aria inalata, sono limitati.

Gli effluenti degli incendi si dividono in due macro-componenti, i fumi e il particolato.

Le manifestazioni cliniche più frequenti legate all'inalazione dei suddetti sono:

- **fumi:** respiro accelerato, tosse, difficoltà di respiro, raucedine ecc. Nelle successive 24-48 ore dall'esposizione, può insorgere ipossiemia (carenza di ossigeno nel sangue). Quest'ultima può aggravarsi quando insorgono gli edemi polmonari, in quanto la funzionalità respiratoria è ulteriormente limitata. I meccanismi di difesa del polmone vengono a mancare e spesso possono anche instaurarsi delle infezioni batteriche. Successivamente può instaurarsi una sindrome da distress respiratorio (ARDS), le cui cause sono tutt'ora poco chiare e che contribuisce in modo non irrilevante al peggioramento delle condizioni degli esposti.

L'ossido di carbonio è il maggiore responsabile dell'avvelenamento, esso si sostituisce all'ossigeno nel sangue, grazie soprattutto all'affinità che ha con la molecola dell'emoglobina. Questo fenomeno porta ad una carenza di ossigeno negli organi che necessitano di un suo continuo apporto, come il cervello ed il cuore, coinvolgendo molto spesso il sistema nervoso centrale. La sintomatologia nota comprende cefalea, nausea e vomito, stato confusionale, disturbi della vista, perdita dello stato di coscienza, convulsioni, fino ad arrivare al coma ed infine alla morte;

- **polveri sottili:** inizialmente erano note solamente le polveri con diametro pari a 10  $\mu\text{m}$ , per le quali i danni provocati dall'inalazione si limitavano all'accumulo delle stesse nelle vie aeree e nei polmoni. Successivamente sono stati identificati particolati con diametri inferiori, nello specifico di 2.5  $\mu\text{m}$ . Le particelle di tali dimensioni possono non solamente essere inalate ma anche respirate, ossia entrare nel sangue attraverso gli alveoli polmonari e raggiungere tutti gli altri organi, dove depositandosi, possono portare ad un malfunzionamento dell'organo stesso. Entrambe le frazioni granulometriche, se inalate, possono peggiorare situazioni

respiratorie già compromesse. Recenti studi hanno inoltre dimostrato come il particolato più fine sia in causa nella genesi di tumori.

Lo stoccaggio di rifiuti, inteso sia come operazioni di smaltimento che come operazioni di recupero, è un'attività che deve sempre rispondere alla normativa sulla sicurezza nei luoghi di lavoro, nonché alle norme generali di prevenzione degli incendi, che impongono al datore di lavoro di valutare tutti i rischi connessi all'esercizio dell'impianto. È obbligatorio dunque adottare tutte le misure di prevenzione e protezione necessarie. L'innescò di un incendio all'interno di un impianto, in cui sono presenti dei rifiuti, dovrà pertanto attivare tutte le opportune azioni previste nel piano di gestione dell'emergenza, anche in relazione ai rischi di natura chimico-biologica e ambientale.

La sensibilizzazione al riciclaggio maturata negli ultimi anni, così come l'esigenza di trattare i rifiuti in maniera differente in relazione alla "pericolosità" degli stessi, hanno di fatto portato ad una differenziazione degli stoccaggi. Per questo motivo all'interno degli impianti di trattamento o smaltimento dei rifiuti, si è avuta una sorta di omogeneizzazione dei materiali depositati. Possiamo infatti trovare depositi di rifiuti liquidi o solidi, all'aperto o al chiuso, imballati e non, sempre in relazione alle caratteristiche ed alla pericolosità del rifiuto stesso.

In ultimo, ma non per importanza, è da segnalare che non sempre tali impianti sono collocati in aree scarsamente abitate, come ci si aspetterebbe; non è raro infatti avere degli insediamenti più o meno densamente popolati anche nelle immediate vicinanze di questi impianti. Per questo motivo si comprende ancora meglio l'esigenza di studiare come gli effluenti derivanti da un incendio di rifiuti possano ricadere sul territorio e sulla popolazione.

Il presente lavoro di tesi si focalizza sugli incendi che possono svilupparsi da impianti di riciclaggio in cui sono presenti stoccaggi di rifiuti di materie plastiche.



# Capitolo 1

## Il ciclo e i numeri dei rifiuti in Italia

Il capitolo 1 riporta una panoramica sulle quantità di rifiuti presenti sul territorio nazionale, sulla loro gestione e distribuzione territoriale, divisi per tipologia e regione. In aggiunta, si riporta un breve focus sulla normativa europea in vigore e gli obbiettivi da essa prefissati.

### 1.1 Produzione al livello nazionale e direttiva comunitaria

Il Decreto Legislativo del n.22, del 5 febbraio 1997, definisce rifiuto un qualsiasi oggetto o sostanza, derivante da una qualsiasi attività umana o da cicli naturali, di cui il detentore abbia deciso di disfarsene, in autonoma scelta oppure obbligatoriamente.

A seconda dell'origine si dividono in rifiuti urbani e rifiuti speciali, mentre a seconda delle caratteristiche vengono classificati come rifiuti pericolosi e rifiuti non pericolosi.

La Tabella 1 seguente mostra la produzione di rifiuti solidi urbani sul territorio italiano, divisa per regioni.

Tabella 1. Quantità rifiuti prodotti espressi in migliaia di tonnellate<sup>[1]</sup>.

Regione	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>	<i>t*1000</i>
Piemonte	2254	2245	2251	2160	2027	2004	2051	2051	2066	2064
Valle d'Aosta	77	79	80	78	77	73	72	72	73	74
Lombardia	5022	4925	4958	4824	4627	4595	4642	4625	4782	4685
Trentino-Alto Adige	506	515	509	522	505	495	495	488	510	519
Veneto	2415	2372	2409	2305	2214	2213	2240	2191	2389	2335
Friuli-Venezia Giulia	612	592	610	575	551	546	553	562	582	589
Liguria	988	978	991	962	919	890	894	872	845	830
Emilia-Romagna	2951	2915	3000	2919	2801	2780	2824	2856	2905	2860
Toscana	2545	2474	2513	2373	2253	2234	2254	2276	2307	2244
Umbria	548	532	541	507	488	470	476	463	471	451
Marche	865	847	838	822	801	764	796	793	811	817
Lazio	3344	3333	3431	3316	3199	3161	3085	3023	3025	2972
Abruzzo	699	689	681	662	627	600	593	594	602	597

<b>Regione</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Molise	135	136	132	133	127	124	121	122	120	117
Campania	2723	2719	2786	2640	2554	2545	2564	2567	2628	2561
Puglia	2135	2150	2150	2095	1972	1929	1912	1895	1914	1876
Basilicata	228	225	221	220	219	207	201	199	202	196
Calabria	922	944	942	898	852	830	811	803	793	774
Sicilia	2650	2602	2610	2580	2426	2380	2341	2350	2357	2299
Sardegna	847	837	825	795	755	733	725	720	734	723
<b>ITALIA</b>	<b>32466</b>	<b>32109</b>	<b>32478</b>	<b>31386</b>	<b>29994</b>	<b>29573</b>	<b>29650</b>	<b>29522</b>	<b>30116</b>	<b>29583</b>

Dopo l'aumento riscontrato tra il 2015 e il 2016, si nota immediatamente come nel corso del 2017 la produzione di rifiuti urbani sia nuovamente calata, attestandosi sui 29,6 milioni di tonnellate. Si è registrata infatti una riduzione pari a 1,8 punti percentuali rispetto all'anno precedente, corrispondente a circa 534 mila tonnellate in meno di rifiuti prodotti rispetto al 2016. Il calo della produzione è avvenuto in tutte le regioni e, andando a considerare le tre macro-aree geografiche, si nota una riduzione pari a:

- - 2,2% nel Sud
- - 2% nel Centro
- - 1,4% al Nord

Nel corso degli anni, la produzione di rifiuti è stata considerata come un inevitabile e imprescindibile sottoprodotto dell'attività economica e della crescita. Fortunatamente, grazie a una maggiore sensibilità al problema ambientale, così come alle moderne tecnologie e pratiche di allevamento e agricoltura più attente, tale collegamento ciclico può essere rotto. Il dato appena riscontrato è sicuramente importante e senza dubbio concerne a quanto imposto dalla Direttiva sui rifiuti (Direttiva 2008/98/ CE). Essa stabilisce infatti un quadro giuridico in materia di trattamento dei rifiuti nel territorio comunitario, finalizzato alla protezione dell'uomo e dell'ambiente. Nasce da una profonda esigenza di dover invertire la rotta del vecchio modello economico, puntando ad una maggiore efficienza nell'uso delle risorse, passando di fatto ad un modello cosiddetto di economia circolare. Il modello di economia circolare che consiste sostanzialmente nel mantenere il più a lungo possibile il valore di prodotti, materiali e risorse e allo stesso tempo minimizzare la produzione dei rifiuti, rappresenta in definitiva il modello da seguire per garantire lo sviluppo di un'economia più sostenibile, efficiente nell'uso delle risorse e a basse emissioni di CO<sub>2</sub>.

I punti chiave sui quali si basa la direttiva sono i seguenti:

- 1) La direttiva stabilisce innanzitutto una gerarchia di azioni da intraprendere in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti che sono:
  - a) prevenzione;
  - b) riutilizzo;
  - c) riciclaggio;
  - d) recupero per altri scopi (ad esempio produzione di energia);
  - e) smaltimento.
- 2) Ribadisce il principio “Chi inquina paga”, ossia che è onere del produttore iniziale accollarsi anche i costi di gestione del prodotto quando diventerà un rifiuto.
- 3) Introduce un concetto di “Responsabilità estesa del produttore”, ovvero che è il produttore ad avere la responsabilità finanziaria e organizzativa della gestione della fase del ciclo di vita in cui il prodotto diventa un rifiuto, incluse le operazioni di raccolta differenziata, di cernita e di trattamento.
- 4) Distingue tra rifiuti e sottoprodotti. Quest’ultimo è inteso come il risultato non principale di un processo di produzione. Scopo di tale processo era invece ottenere un altro prodotto. A differenza del rifiuto, il sottoprodotto deve dunque poter essere utilizzato in seguito.
- 5) La gestione dei rifiuti deve avvenire senza che vi sia alcun rischio per acqua, aria, suolo, flora e fauna, così come non deve arrecare danni al paesaggio ed eventualmente a siti di importanza storica e culturale.
- 6) Produttori e detentori di rifiuti devono trattarli autonomamente oppure consegnarli a degli operatori, ufficialmente riconosciuti, che se ne occuperanno.
- 7) È compito delle Autorità nazionali competenti elaborare piani di gestione e prevenzione dei rifiuti.
- 8) Per i rifiuti organici, oleosi e pericolosi si applicano delle condizioni particolari di gestione e smaltimento.
- 9) Introduce obiettivi di riciclaggio e di recupero da raggiungere entro il 2020.

## 1.2 Percentuale raccolta differenziata in Italia

Come precedentemente accennato, relativamente al riutilizzo e riciclaggio dei rifiuti, l'articolo 11 della Direttiva 2008/98/ CE, prevede che entro il 2020 gli Stati membri adottino le misure necessarie per conseguire:

- un aumento sino al 50% in peso della preparazione, per il riutilizzo e il riciclaggio di rifiuti provenienti dai nuclei domestici o da altra origine, ma assimilabili a domestici. Tale frazione percentuale è riferita come minimo alle frazioni di plastica, vetro, metalli e carta presenti all'interno dei rifiuti considerati.

Tale obiettivo è stato recepito nell'ordinamento nazionale tramite l'articolo 181 del D.Lgs. 152/2006 e successivamente modificato dal D.Lgs. 205/2010.

L'emanazione della direttiva 2018/851/UE ha invece introdotto nuovi obiettivi per la preparazione, per il riutilizzo e per il riciclaggio, stabilendo il raggiungimento di nuove percentuali in peso, da conseguirsi entro:

- il 2025 sino al 55%;
- il 2030 sino al 60%;
- il 2035 sino al 65%.

I tre nuovi obiettivi, a differenza del precedente, fanno riferimento all'intero ammontare dei rifiuti urbani prodotti.

Nel 2017 la percentuale di raccolta differenziata sul territorio italiano ha raggiunto il 55,5% della produzione nazionale, con una crescita di oltre 3 punti percentuali rispetto al 2016.

In cifre assolute, la quantità di rifiuti destinati alla raccolta differenziata ammonta a 16,4 milioni di tonnellate, con un aumento di circa 600 mila tonnellate rispetto all'anno precedente.

Se si considera il dato in relazione alle macro-aree geografiche italiane, si ottiene:

- Nord 9,2 milioni di tonnellate raccolti;
- Sud a 3,8 milioni di tonnellate;
- Centro a 3,4 milioni di tonnellate.



Considerando le percentuali rispetto alla produzione totale di rifiuti urbani si ha:

- Nord 66,2%;
- Sud 51,8%;
- Centro 41,9%.

La più alta percentuale di raccolta differenziata nel 2017, così come nel 2016, è stata conseguita dalla regione Veneto con il 73,6%, seguita da Trentino-Alto Adige con il 71,6%, Lombardia con il 69,6% e Friuli-Venezia Giulia con il 65,5%. La Figura 1 mostra le percentuali di raccolta differenziata per ogni Regione italiana.

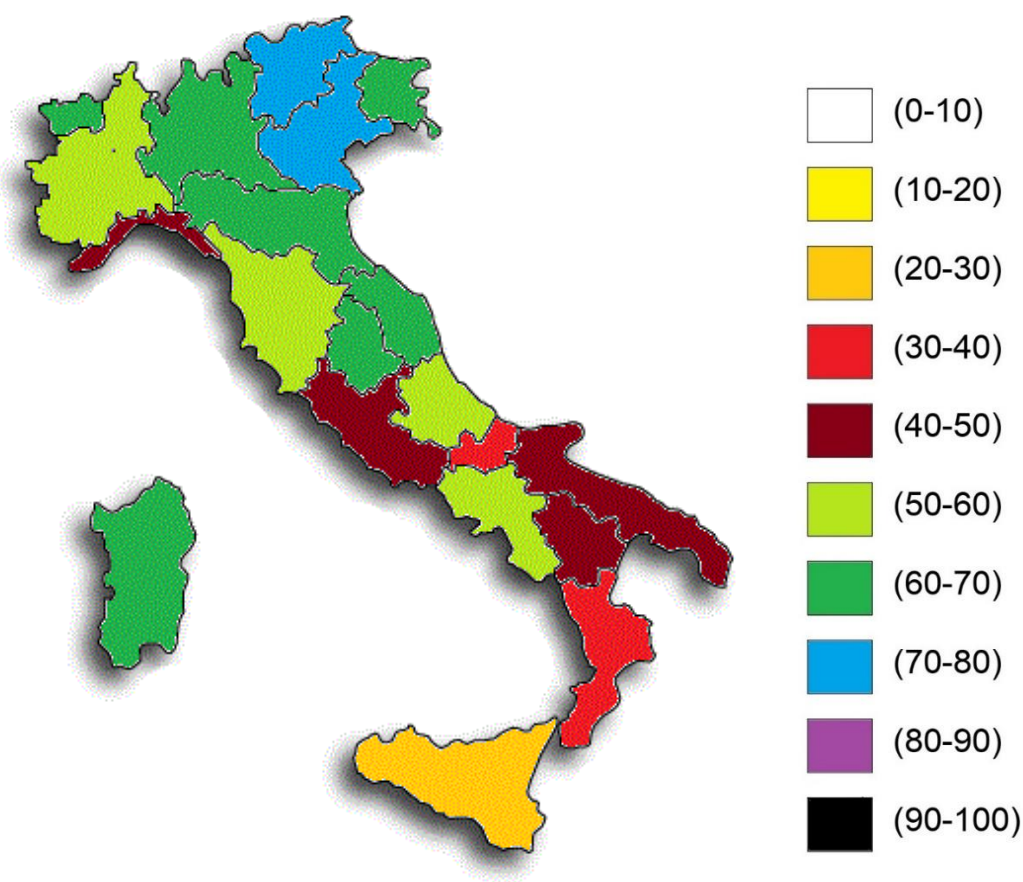


Figura 1. Percentuale di raccolta dei rifiuti urbani suddivisa per regione<sup>[2]</sup>.

### 1.2.1 Composizione dei rifiuti urbani

Nel 2017 la percentuale di preparazione per il riutilizzo e riciclaggio di rifiuti urbani costituiti da organico, carta e cartone, vetro, metallo, plastica e legno si attesta al 49,4%. Oltre un terzo dei quantitativi riciclati è costituito dalla frazione organica e una quota pari al 22,6% da carta

e cartone. Il vetro rappresenta il 7,6% del totale riciclato, la plastica il 12,8% e il legno il 3% circa. Nella Tabella 2 è riportata la frazione merceologica media dei rifiuti urbani prodotti in Italia.

Tabella 2. Composizione merceologica media percentuale dei rifiuti urbani (media periodo 2008-2017) <sup>[2]</sup>.

Frazione merceologica	Nord	Centro	Sud	Italia
	%			
Organico	34,6	32,7	39,8	35,7
Carta	22	25,8	20,2	22,6
Plastica	11,5	14,1	12,9	12,8
Metalli	2,7	2,8	2,3	2,6
Vetro	9,5	6,8	6,6	7,6
Legno	4,5	2,7	1,8	3
RAEE	-	-	-	0,9
Tessili	-	-	-	3,6
Materiali inerti/spazzamento	-	-	-	0,8
Selettiva	-	-	-	0,3
Pannolini/materiali assorbenti	-	-	-	3,5
Altro	-	-	-	6,6

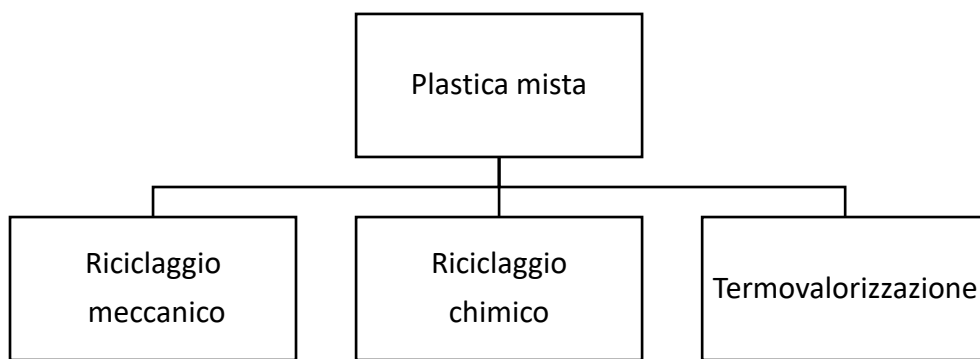
### 1.3 Il riciclo e il recupero della Plastica

Lo smaltimento della plastica può essere effettuato attraverso il recupero e il riciclo della stessa, dalla quale è possibile non solo ottenere nuovi prodotti, ma anche energia, calore ed elettricità.

Il riciclaggio prevede la trasformazione della materia: una volta selezionata e lavorata adeguatamente, la plastica è pronta per essere riutilizzata infine come “materia prima seconda” (MPS); con tale termine si indicano le materie costituite da sfridi di lavorazione delle materie prime oppure da materiali derivati dal recupero e dal riciclaggio dei rifiuti.

A questo punto la plastica viene destinata a dei centri di selezione e riciclo oppure a centri di compattazione e termovalorizzazione.

Si riporta di seguito uno schema riassuntivo dei diversi processi di riciclo della plastica che verranno di seguito descritti.



### ***1.3.1 Separazione e compattazione della plastica***

All'interno di tali impianti si effettua essenzialmente la rilavorazione termica, meccanica o chimica dei rifiuti plastici. A seconda del materiale di partenza, il processo di riciclo necessita anche di un lavaggio preliminare della plastica. Il lavaggio viene eseguito per rimuovere tracce di sporco, residui alimentari ed eventuali sostanze tossiche, in modo da ottenere una materia prima seconda e dei manufatti completamente sicuri e privi di residui indesiderati e di pesticidi.

Raggiunto lo stabilimento di riciclaggio, la plastica raccolta e lavata viene destinata ad una prima fase all'interno di un impianto, che provvede dapprima all'apertura dei sacchetti di raccolta e successivamente alla separazione delle plastiche e dai metalli, quando presenti, mediante degli appositi separatori magnetici.

Si passa a questo punto ad una fase di separazione effettuata con degli appositi vagli rotanti che separano le diverse tipologie di plastiche in relazione alla dimensione delle stesse. Un vaglio rotante è una grossa centrifuga, di solito inserita a monte di impianti di selezione, che consente di effettuare la separazione dei materiali trattati sfruttando le diverse proprietà fisiche da essi posseduti, le quali vengono poi convogliate alle successive fasi del processo di selezione.

Nel caso della plastica il prodotto della separazione, comunemente chiamato sottovaglio, è composto prevalentemente da bottiglie, film plastici, nylon, polistirolo ma anche da frazioni estranee, ad es. carta o tessuti, che vengono inserite per sbaglio nella raccolta differenziata. Il materiale viene poi destinato ad una ulteriore fase di separazione mediante lettori ottici che separano la plastica in base ai polimeri di composizione e a eventuali colorazioni.

Contrariamente al caso precedente, in questo caso la separazione non avviene con un movimento rotatorio, ma con dei soffi d'aria.

Dei lettori ottici sono solitamente installati in successione sulla linea e sono composti rispettivamente da lampade VIS e NIR. Le prime VIS sono dotate di sensori a luce visibile, in grado di individuare i materiali in base alle caratteristiche cromatiche specifiche, mentre le lampade NIR sono dotate di infrarossi a corto raggio in grado di riconoscere i materiali considerando le caratteristiche della loro luce riflessa. In Figura 2 ne è riportato un esempio. In relazione alle applicazioni ed al tipo di materiale che si vuole selezionare, è possibile combinare i sensori dei lettori ottici in maniera differente. Ad esempio si può utilizzare il primo lettore per selezionare solo le bottiglie in polietilene, per poi passare al secondo lettore che seleziona gli altri polimeri.

Oltre ai metodi di separazione meccanici, molto spesso è prevista anche una selezione manuale delle materie plastiche. Il materiale che passa sul nastro trasportatore, viene passato al vaglio da una serie di addetti che hanno il compito di rimuovere eventuali materiali plastici non idonei al riciclaggio perché erroneamente smaltiti nella raccolta differenziata e correggere eventuali errori delle macchine (ad esempio quelli del lettore ottico sulla lettura del pigmento delle bottiglie).

La disposizione delle varie fasi è ovviamente variabile, in relazione soprattutto alla tipologia di materiali ricevuti, dalla destinazione degli stessi e dalla configurazione dell'impianto, anche in relazione alla presenza più o meno considerevole di manodopera.

A questo punto le materie plastiche vengono convogliate in una pressa e compattate in imballi omogenei per tipologia di plastica:

1. polietilene tereftalato - PET (data principalmente da bottiglie) in tre diverse colorazioni, cioè colorato, azzurrato e trasparente;
2. polietilene ad alta densità - HDPE (dato principalmente dai fustini dei detersivi e flaconi vari);
3. polietilene a bassa densità - LDPE (dato principalmente da buste, shopper e altro estensibile industriale).

Una volta ultimata questa fase di selezione è possibile dunque attivare uno dei seguenti processi di riciclo:

- Riciclo meccanico omogeneo o rilavorazione;
- Riciclo meccanico eterogeneo o trasformazione;



- Riciclo chimico;
- La parte di materiale plastico non recuperabile andrà invece a formare il cosiddetto rifiuto che costituisce la base per il recupero energetico (termovalorizzatore).



Figura 2. Fase di selezione tramite detettori NIR per tipo di colore sulle bottiglie di PET.



Figura 3. Stoccaggio del PET in balle, pronte per essere avviate negli impianti di riciclo.

### ***1.3.2 Riciclo meccanico omogeneo o rilavorazione***

Il materiale confezionato in balle di prodotto omogeneo viene avviato al successivo processo di lavorazione, che consente di ottenere nuove risorse da questi rifiuti. I materiali oramai divisi in pile omogenee, vengono macinati, lavati (per eliminare eventuali residui di colle, organici ecc.) ed ulteriormente separati con i sistemi visti in precedenza. Attraverso una sequenza di passaggi (macinazione a umido, flottazione, lavaggio, centrifugazione, essiccamento, macinazione fine, controlli) si ottengono infine quindi scaglie polimero destinate ad ulteriori lavorazioni.

### ***1.3.3 Riciclo meccanico eterogeneo o trasformazione***

Per materiali provenienti da raccolte differenziate senza selezione, contenenti PE, PP, PS, PVC e altri polimeri, il riciclo procede secondo tre fasi:

- triturazione e frantumazione grossolana del materiale;
- densificazione;
- estrusione.

Ovviamente non tutti i polimeri sono sufficientemente compatibili, in modo tale da rendere economicamente vantaggiosa la loro miscelazione. Può accadere infatti che miscelando due polimeri diversi non si ottengono proprietà intermedie tra quelle dei polimeri di partenza, ma si ottengono proprietà tanto migliori o peggiori a seconda del livello di compatibilità degli stessi. Per ovviare a questo problema, spesso, si aggiunge alla mistura un terzo componente, detto compatibilizzante.

La plastica eterogenea mista ottenuta, ha delle proprietà meccaniche e di resistenza inferiori rispetto a quella omogenea, ma resta comunque un'ottima alternativa e trova largo impiego nella produzione di articoli e arredi per giardini, panchine, recinzioni, arredi per la città, cartelloni stradali, ecc.

### ***1.3.4 Riciclo chimico o depolimerizzazione***

I materiali trattati con questo metodo ritornano ad essere delle materie prime seconde attraverso metodi chimici o termochimici: le plastiche usate ritornano ad essere dei monomeri di pari qualità di quelli vergini, pronti per essere utilizzati in un nuovo ciclo produttivo.

I polimeri delle diverse plastiche vengono sostanzialmente scomposti nei rispettivi monomeri, innescando una sorta di processo inverso rispetto a quello della loro formazione. I polimeri di policondensazione, per loro natura chimica, si prestano meglio a questo genere di trattamento, infatti il PET polietilentereftalato, le poliammidi PA (Nylon) ed i poliuretani PU possono essere efficacemente depolimerizzati.

I processi di decomposizione chimica sono vari e si differenziano in base al metodo utilizzato per compiere la depolimerizzazione. I più comuni sono Glicosi, Metanolisi e Ammonolisi. Si tratta di processi che utilizzano rispettivamente glicol tereftalico, metanolo e ammoniaca e che decompongono i polimeri, riportandoli allo stato di monomeri o di materia prima originale. Questi reagenti causano la decomposizione dei polimeri, tuttavia non si arriva alla struttura base di partenza ma a stadi intermedi. Tali procedimenti risultano vantaggiosi dal punto di vista economico solo per lo smaltimento di grandi quantità di materie plastiche, ma restituiscono un prodotto di ottima qualità.

Altri processi comuni di depolimerizzazione sono la Pirolisi, l'Idrogenazione e la Gassificazione. Nel primo caso il processo consiste nel portare il materiale sottovuoto ad alte temperature, così da ottenere gli idrocarburi e i gas in esso contenuti. Nel secondo caso si raggiunge lo stesso obiettivo sfruttando l'azione combinata dell'idrogeno e del calore, mentre l'ultimo caso è un processo effettuato in assenza di aria e a temperature dell'ordine degli 800°- 1600°C, dove si ottiene una miscela di syngas da utilizzare come combustibile nelle centrali termiche, per la lavorazione di altre materie oppure per la sintesi di altri prodotti chimici come il metanolo.

### ***1.3.5 Recupero energetico o termovalorizzazione***

Il materiale plastico raccolto che non può essere riciclato o che non è economicamente vantaggioso riciclare, può essere destinato al recupero energetico mediante il processo di termovalorizzazione. Il termovalorizzatore non è altro che una tipologia di inceneritore, il cui calore sviluppato durante la combustione dei rifiuti, viene utilizzato per produrre energia elettrica o come vettore di calore. La plastica, essendo un derivato del petrolio, possiede un buon potere calorifero, paragonabile quasi a quello del carbone, ed è quindi importante sfruttare e riutilizzare l'energia contenuta nei rifiuti.

I rifiuti, dopo un'accurata selezione ed uno specifico trattamento di triturazione, prendono il nome di CDR – Combustibili Derivati dai Rifiuti – e sono molto utilizzati, oltre che nella produzione di energia, anche in alcuni processi industriali, come ad esempio nei cementifici. Il residuo di rifiuti, dopo la termovalorizzazione si attesta attorno al 10-12% del volume iniziale dei rifiuti, con un peso attorno al 15-20% dei rifiuti stessi, tuttavia resta la problematica legata alla tossicità dei derivanti dalla combustione. È necessario pertanto dotare gli impianti di efficaci sistemi di abbattimento degli inquinanti.

Gli impianti di questo tipo possono bruciare da 4 a 30 tonnellate di rifiuti ogni ora, producendo fino 450 kWh di energia elettrica per tonnellata di rifiuto e, se utilizzabile, fino a 1000 kWh di calore a bassa temperatura.

Il recupero di energia mediante i termovalorizzatori ha rappresentato negli ultimi decenni una valida soluzione al problema dei rifiuti. La combustione confinata e controllata dei rifiuti rappresenta infatti una importante alternativa rispetto all'interramento in discarica degli stessi, riducendo di fatto i volumi di rifiuti e di conseguenza anche le emissioni di metano dalle discariche e, allo stesso tempo, si è ridotta la richiesta di energia da fonti fossili. La termovalorizzazione è infatti divenuta, secondo l'EPA una sorgente di energia rinnovabile.

## **1.4 Il riciclo e il recupero della Plastica**

Non tutti i rifiuti realizzati in plastica possono essere riciclati. In generale, sono destinati al processo di riciclaggio tutti i prodotti che recano le sigle PE, PET e PVC, mentre tutte le altre plastiche e i contenitori con residui di materiali organici o pericolosi sono da considerarsi esclusi dal processo, ma destinabili alla termovalorizzazione o al recupero energetico.

Nel primo caso, i rifiuti sono detti economicamente riciclabili e comprendono tutti i contenitori per liquidi, bottiglie per bevande, flaconi per prodotti per l'igiene personale e della casa, vaschette per l'asporto del cibo, confezioni di alimenti, polistirolo espanso degli imballaggi, borse di nylon e pellicola in plastica.

Nel secondo caso si tratta di rifiuti non economicamente riciclabili, ossia tutti quei contenitori che non recano le sigle PE, PP, PET e PVC; sono fondamentalmente contenitori che presentano residui di materiali organici (es.: cibi) o di sostanze pericolose (vernici, colle, etc.), giocattoli, custodie cd, musicassette e videocassette, piatti, bicchieri e posate in



plastica, tubi di dentifricio, bottiglie di olio, rifiuti ospedalieri (es.: siringhe, sacche per il plasma, contenitori per liquidi fisiologici e per emodialisi), beni durevoli di plastica (es.: articoli di casalinghi, elettrodomestici, completi per l'arredo, etc.), articoli per l'edilizia, grucce per appendiabiti, ecc.

Nella Figura 4 è illustrato il ciclo della plastica, ossia l'insieme delle operazioni che vengono svolte sui rifiuti costituiti da plastica per ottenere nuovo materiale da reimmettere nei processi produttivi.

# CICLO DELLA PLASTICA



Figura 4. Operazioni principali sui rifiuti per ottenere nuovo materiale.

# Capitolo 2

## Il fenomeno degli incendi di rifiuti

Nel capitolo 2 viene condotta un'analisi degli incendi che avvengono su impianti di trattamento e smaltimento di rifiuti, con riferimento al contesto nazionale italiano. Di seguito un breve focus sulla normativa vigente per gli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti, in materia di sicurezza.

### 2.1 Eventi significativi sul territorio nazionale

La Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati, nel corso del 2017, ha effettuato una raccolta dati ed un approfondimento in merito agli incendi di impianti di stoccaggio di rifiuti, relativi al triennio 2014-2016 e il periodo gennaio - giugno 2017. Dal rapporto emesso è emerso come nel corso del triennio siano stati segnalati incendi di rifiuti sul territorio nazionale. Il numero cresce fino a 261 se si considerano anche gli eventi segnalati negli anni precedenti al 2014.

#### 2.1.1 Distribuzione sul territorio nazionale

Nella Tabella 3, si possono osservare il numero di incendi esaminati dalla Commissione, divisi per anno e tra quelli che hanno colpito impianti di trattamento di rifiuti e quelli che hanno colpito discariche:

Tabella 3. Numero di incendi segnalati sul territorio nazionale nel periodo 2014-2017 <sup>[1]</sup>.

	<b>IMPIANTI</b>	<b>DISCARICHE</b>	<b>Totale</b>
<b>Anni precedenti al 2014</b>	11	0	11
<b>2014</b>	35	7	42
<b>2015</b>	59	12	71
<b>2016</b>	58	7	65
<b>2017 (gennaio – agosto)</b>	66	6	72
<b>Totale</b>	229	32	<b>261</b>

Come si evince dalla tabella, solo la prima metà dell'anno 2017 ha segnato il massimo incremento tendenziale dell'ultimo triennio, anche se nei due anni precedenti era già stato considerevole.

Volendo considerare la distribuzione territoriale degli eventi sulle macro-aree geografiche, avremo che:

- al Nord 52,6%;
- al Sud 21,6%;
- nel Centro 13,8%.

Questa distribuzione, tendenzialmente opposta ai storici problemi che hanno afflitto le regioni meridionali, è legata soprattutto alla maggior concentrazione di impianti di recupero e smaltimento di rifiuti nelle zone settentrionali, inevitabilmente legata alla maggior urbanizzazione e presenza di complessi industriali rispetto al Sud e alle Isole. Nella Tabella 4 sono riportati i dati relativi al numero di incendi sul territorio nazionale italiano nel periodo 2014-2017, divisi per macro-aree e la loro incidenza in percentuale sul totale.

Tabella 4. Numero di incendi segnalati sul territorio nazionale nel periodo 2014-2017, divisi per macro-aree e incidenza percentuale sul totale<sup>[1]</sup>.

	<b>Incendi</b>	<b>Incidenza</b>
<b>NORD</b>	124	47,5%
<b>CENTRO</b>	43	16,5%
<b>SUD</b>	62	23,7%
<b>ISOLE</b>	32	12,3%
<b>TOTALE</b>	<b>261</b>	<b>100%</b>

Il dato tuttavia può non risultare totalmente esaustivo della situazione, la Commissione ha infatti stimato una mancata comunicazione di circa un terzo degli eventi alla Procura della Repubblica, ai quali si aggiunge una quota ulteriore dovuta ad alcuni incendi gestiti autonomamente dal sistema di gestione delle emergenze interno alle aziende responsabili degli impianti, per i quali non è stato richiesto l'intervento dei Vigili del Fuoco.

Nella Tabella 5 sono riportati gli eventi più significativi avvenuti nei primi 6 mesi del 2017 sul territorio italiano.

Tabella 5. Incendi segnalati sul territorio nazionale nel primo semestre del 2017 <sup>[2]</sup>.

<b>Evento</b>	<b>Descrizione</b>
11 marzo Chieti Scalo	Incendio nell'impianto di trattamento dei rifiuti ex Seab. I cittadini denunciano lo svilupparsi di molti roghi negli impianti che circondano la città. Se ne registrano ben 19.
25 marzo Rossano Veneto (Vicenza)	Maxi incendio divampato alle prime luci dell'alba a Rossano Veneto nel capannone di un'azienda che smaltisce batterie, oli esausti e rifiuti speciali.
16 aprile Follo (La Spezia)	Un vasto incendio ha interessato l'azienda Ferdeghini, nella quale è presente un impianto di trattamento rifiuti che si occupa della selezione, recupero e stoccaggio di materiali pericolosi e non. Per precauzione sono state emanate delle ordinanze che consigliano ai cittadini di tenere le finestre chiuse e limitare gli spostamenti a piedi allo stretto necessario. Vietato anche utilizzare l'acqua sorgiva e raccogliere e consumare ortaggi, frutta e verdura dei campi. La stessa cosa hanno predisposto i cittadini di Bolano e Vezzano Ligure.
5 aprile Pinerolo (Torino)	Rogo in un centro di raccolta rifiuti dell'azienda Cmt.
12 aprile Strillaia (Grosseto)	60 tonnellate di rifiuti a fuoco in uno stabilimento a Strillaia.
24 aprile Gaggiano (Milano)	A fuoco lo stabilimento per il trattamento dei rifiuti. Sono 14 i mezzi andati fuori uso.
5 maggio Pomezia (Roma)	Va a fuoco l'impianto di trattamento dei rifiuti EcoX. È un incendio che distrugge completamente l'azienda a sud di Roma. Si indaga per inquinamento ambientale colposo e incendio colposo. Ancora ignota la causa dell'incendio che ha fatto anche crollare il tetto in Eternit dell'azienda. Si ipotizza la matrice dolosa. Secondo i vigili del fuoco l'innesco sarebbe avvenuto all'esterno dell'azienda dove da giorni erano accumulati grandi quantità di rifiuti, tanto che i cittadini l'avevano anche segnalato con un esposto al sindaco.
23 maggio Parona (Pavia)	Un incendio è divampato in un'azienda specializzata nel trattamento di rifiuti speciali, l'Aboneco recycling di Parona (Pavia).
25 maggio Malagrotta (Roma)	A fuoco il deposito di rifiuti nella discarica di Malagrotta. Dopo poche ore sarebbe dovuta arrivare la Commissione d'inchiesta sul ciclo dei rifiuti per un'ispezione.
29 maggio Masotti (Pistoia)	Incendio alla ditta Technology che si occupa di smaltimento di rifiuti speciali. L'innesco sarebbe stato dovuto, in questo caso, a un filtro difettoso della ciminiera dell'impianto che smaltisce toner esausti.

<b>Evento</b>	<b>Descrizione</b>
5 giugno Rosolini (Siracusa)	In fiamme autoparco di mezzi per la raccolta di rifiuti di Rosolini a Siracusa. Si tratta della ditta che ha l'appalto per la raccolta e lo smaltimento dei rifiuti nel comune.
7 giugno Marghera (Venezia)	Un incendio di vaste proporzioni ha interessato un capannone per il trattamento dei rifiuti ingombranti della società Ecoricicli. L'impianto era stato inaugurato a dicembre 2016 ed è capace di trattare 28.800 tonnellate di ingombranti all'anno e recuperare materiale per seguire poi le filiere del riciclaggio.
8 giugno Casale Bussi (Viterbo)	A fuoco un impianto di trattamento meccanico-biologico dei rifiuti, che ha reso possibile il conferimento da parte dei comuni della zona nord della provincia di Roma.
14 giugno Castelforte (Lazio)	Incendio di modeste dimensioni a un impianto trattamento rifiuti. Il proprietario è stato anche oggetto di intimidazioni.
15 giugno Calvi Risorta (Caserta)	Rogo in area sequestrata per disastro ambientale. Si è rischiato che le fiamme toccassero i rifiuti dissotterrati nell'ex area industriale Pozzi Ginori. Sono andati a fuoco anche rifiuti industriali.
18 giugno Alessandria	A fuoco una parte dell'impianto della Raee Man di Sale, che si occupa di rifiuti industriali e speciali.
20 giugno Terranuova Bracciolini (Arezzo)	Va a fuoco un impianto di compostaggio. L'incendio si sviluppa all'interno di un lotto che contiene rifiuti di tipo tessile.
20 giugno Roma	Incendio al deposito cassonetti Ama sulla Pontina.
27 giugno Cannicci Di Monte Antico (Grosseto)	Circa 73mila metri quadrati di rifiuti urbani sono interessati da un incendio nella discarica del grossetano. A bruciare è stato il telone di coibentazione nel contenitore con sponde alte di otto metri.
27 giugno Monterotondo (Roma)	Fiamme in un capannone per la raccolta e lo smaltimento dei rifiuti. Ad andare a fuoco carta, legno e plastica.

Nell'Appendice A sono riportati nel dettaglio tutti gli eventi di incendio in impianti di trattamento, smaltimento, recupero dei rifiuti verificatisi nel periodo 2014-2017, divisi per regione sul territorio italiano.

### ***2.1.2 Cause dell'aumento degli incendi***

Determinare le cause che possano spiegare un aumento così considerevole del fenomeno risulta tutt'altro che semplice ed immediato e non è argomento di tale trattazione.

Al livello ingegneristico si può senz'altro dire che gli incendi di rifiuti possono essere generati da cause molteplici, tra cui ad esempio:

- di natura dolosa;
- fermentazione di materiale organico;
- guasti elettrici;
- utilizzo improprio di fiamme libere.

Tali cause sono sicuramente rese ancor più determinanti da problematiche di vario genere più o meno comuni a tutti gli impianti che trattano rifiuti:

- l'età degli impianti, con tutte le conseguenti carenze strutturali e organizzative;
- l'assenza di adeguati sistemi di sorveglianza e controllo;
- il ridotto numero di impianti che porta inevitabilmente a situazioni di sovraccarico degli impianti esistenti e quindi di incrementato pericolo di incendio;
- la carente efficienza della macchina dei controlli da parte delle autorità e quindi rifiuti stoccati anche dove non dovrebbero;
- l'assenza di adeguati investimenti, mirati alla prevenzione e alla tutela dell'ambiente e della salute delle persone;
- la poca domanda a valle del mercato dei materiali riciclabili e quindi un sovraccarico di materiali non gestibili.

Proprio quest'ultima condizione ha fatto sì che negli ultimi anni fosse sempre più diffuso il cosiddetto "incendio doloso liberatorio", ossia un incendio innescato strategicamente per liberare l'impianto o l'azienda dal sovraccarico di materiale non gestibile.

## **2.2 Gli stoccaggi di rifiuti**

Il diffondersi di numerosi episodi di incendi in impianti di trattamento di rifiuti, ha portato il Ministero dell'Ambiente, in collaborazione con il Dipartimento dei Vigili del Fuoco, le amministrazioni regionali e le agenzie ambientali, all'adozione delle Linee Guida operative.

Si tratta di una serie di indicazioni orientate alla prevenzione del rischio incendio negli impianti che gestiscono rifiuti, pubblicate nella Circolare n. 4064 del 15 marzo 2018.

L'art. 26-bis della Legge 132/2018 pone in capo ai gestori di impianti di stoccaggio e di lavorazione dei rifiuti, esistenti o di nuova costruzione, l'obbligo di predisporre un piano di emergenza interna.

Successivamente il Ministero dell'Ambiente ha nuovamente scelto di intervenire sul fronte operativo, annullando e sostituendo la precedente circolare n. 4064/2018, con la nuova circolare n. 1121 del 21 gennaio 2019. Con essa sono state dunque introdotte le nuove "Linee Guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi".

### ***2.2.1 Le nuove Linee Guida per la gestione operativa degli stoccaggi***

Mantenendo l'indice tematico delle precedenti Linee Guida adottate con la circolare n. 4064/2018, nel nuovo testo viene subito precisato a quali impianti si riferiscano questi criteri operativi.

#### **2.2.1.1 Quadro normativo**

Viene ripercorso il quadro normativo in tema di prevenzione del rischio sul lavoro, evidenziando che "la valutazione del rischio nei luoghi di lavoro, compreso il rischio di incendio, è un obbligo che impone al datore di lavoro il dovere di adottare, anche dove manchi una specifica regola di prevenzione, le misure generiche di prudenza e diligenza, nonché tutte le cautele necessarie, secondo le norme tecniche e l'esperienza, a tutelare l'integrità fisica dei propri lavoratori". Si aggiungono poi il D.M. 10 marzo 1998, che stabilisce "i criteri per la valutazione dei rischi di incendio nei luoghi di lavoro e le misure di prevenzione e di protezione antincendio da adottare, al fine di ridurre l'insorgenza di un incendio e di limitarne le conseguenze qualora esso si verifichi", e le linee-guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili in materia di gestione dei rifiuti in vigore, relative allo stoccaggio ed alla movimentazione dei rifiuti di cui al D.M. 29 gennaio 2009.



### **2.2.1.2 Contesto autorizzativo degli stoccaggi e garanzie finanziarie**

Gli impianti di stoccaggio operano nell'ambito di autorizzazioni integrate ambientali (AIA), di procedure ordinarie (art. 208 del D.Lgs. 152/2006), mentre per operazioni di solo recupero è sufficiente la procedura semplificata di cui all'art. 216 del D.Lgs. 152/06.

Per quanto concerne le garanzie finanziarie previste nell'ambito delle procedure ordinarie di autorizzazione, il Ministero invita, le autorità competenti al rilascio dell'autorizzazione ad includere tra le misure precauzionali e di sicurezza quelle concernenti il rischio di incendio correlato alle tipologie e quantitativi di rifiuti autorizzati.

### **2.2.1.3 Prevenzione del rischio**

Le Linee Guida inerenti a questa sezione risultano praticamente inalterate rispetto alla precedente versione. La prevenzione del rischio dell'impianto deve essere assicurata attraverso:

- l'ottimizzazione delle misure organizzative e tecniche;
- l'adeguata informazione e formazione del personale che opera negli impianti;
- il controllo e il monitoraggio delle sorgenti di innesco e delle fonti di calore;
- l'adeguata manutenzione delle aree, dei mezzi d'opera, degli impianti tecnologici e degli eventuali impianti di protezione antincendi.

Per quanto riguarda l'organizzazione interna dell'impianto, il Ministero suggerisce una adeguata sistemazione della viabilità interna e degli spazi, di modo da differenziare, tramite apposita segnaletica e cartellonistica, le aree di accettazione in ingresso, le aree di stoccaggio e di lavoro. Tali aree dovranno essere mantenute in ordine, rispettando sempre le capacità di stoccaggio massime autorizzate.

I rifiuti liquidi devono essere stoccati in serbatoi in possesso di adeguati requisiti di resistenza, in relazione alle proprietà chimico-fisiche ed alla pericolosità dei rifiuti stessi. Devono altresì essere opportunamente etichettati e dotati di adeguati sistemi di sicurezza, in particolare dei bacini a tenuta per contenimento di eventuali sversamenti in fase di movimentazione dei contenitori o di rottura degli stessi.

I rifiuti solidi, invece, possono essere stoccati anche in cumuli di altezza variabile o in fosse. Restano inalterate le disposizioni riguardanti la formazione ed informazione del personale operante negli impianti. È importante individuare un numero adeguato di lavoratori

incaricati dell'attuazione delle misure di prevenzione incendi e lotta antincendio, di primo soccorso e di gestione dell'emergenza, che dovranno ricevere un'adeguata formazione e aggiornamento.

Deve essere realizzato un impianto idrico antincendio adeguato ed altri impianti di spegnimento manuali e/o automatici, così come il giusto numero e posizionamento nel sito degli estintori portatili e carrellati.

È necessario dedicare una maggiore attenzione circa controllo e monitoraggio delle sorgenti d'innesco e delle fonti di calore. In questo modo è possibile evitare i fenomeni di autocombustione e di conseguenza si riduce il rischio di incendi.

Il gestore è anche richiamato a prestare una maggiore attenzione all'attività di manutenzione delle aree, sia adibite agli stoccaggi sia all'eventuale trattamento dei rifiuti, e degli impianti tecnologici in base alle cadenze stabilite dal costruttore ovvero dalla legge, dei mezzi e degli eventuali impianti di protezione antincendi.

#### **2.2.1.4 Prescrizioni generali**

Per l'ubicazione degli impianti si prediligono gli insediamenti industriali ed artigianali, le aree industriali o di servizi dismesse, sempre rispettando i requisiti di compatibilità ambientale ed in base alla disponibilità di un'adeguata rete di collegamento, nel rispetto dei vincoli d'uso del territorio previsti dalle specifiche norme di settore.

È necessario individuare una serie di aree all'interno degli impianti che gestiscono rifiuti, ognuna delle quali deve rispettare una serie di requisiti, in particolare:

- ufficio;
- area di ricezione dei rifiuti;
- area destinata allo stoccaggio dei rifiuti per categorie omogenee;
- area per il deposito dei rifiuti fermentescibili;
- locali chiusi attrezzati da destinarsi alla raccolta e stoccaggio dei rifiuti pericolosi;
- area per il deposito delle sostanze da utilizzare per l'assorbimento dei liquidi in caso di sversamenti accidentali;
- recinzione provvista di barriera esterna di protezione ambientale.

### **2.2.1.5 Gestione dell'impianto**

Le nuove Linee Guida ribadiscono il ruolo centrale del Direttore Tecnico dell'impianto, ossia il responsabile della gestione operativa dell'impianto. Un'ulteriore sezione è dedicata alla formazione richiesta per tale ruolo, ossia la qualifica di Responsabile Tecnico Gestione Rifiuti. Il Ministero raccomanda inoltre che il direttore tecnico sia sempre presente in impianto durante l'orario di operatività dello stesso. Nel caso di impianti dotati di organizzazioni complesse, il direttore tecnico può avvalersi, per lo svolgimento delle proprie funzioni, anche di singoli responsabili, purché gli stessi siano in possesso delle conoscenze e dei requisiti allo svolgimento dell'incarico.

### **2.2.1.6 Controlli Ambientali**

L'ultimo punto delle Linee Guida richiama l'attenzione sul fondamentale ruolo dell'attività di controllo. Le possibili cause dell'aumento dei fenomeni di incendio, come specificato nel paragrafo §2.1.2, negli impianti che gestiscono rifiuti possono essere riconducibili anche a:

- una fragilità degli impianti, spesso non dotati di sistemi adeguati di sorveglianza e controllo;
- la rarefazione dei controlli sulla gestione che portano a situazioni di sovraccarico degli impianti e quindi di incrementato pericolo di incendio;
- la possibilità di sovraccarico di materia non gestibile, che quindi dà luogo a incendi dolosi "liberatori".

Da qui l'esigenza di programmare i controlli, tenendo conto della complessità dell'impianto, e alle sue dimensioni, ma evitando di trascurare gli impianti apparentemente minori ma potenzialmente a rischio.

Il Ministero chiude le Linee Guida con un riferimento ai depositi temporanei irregolari, depositi incontrollati e abbandoni di rifiuti presso strutture anche dismesse o all'aperto, esposti a rischio di sviluppo di incendi. In tali casi è opportuno che l'azione di controllo venga estesa, anche agli abbandoni di rifiuti ed alle attività di gestione di rifiuti non autorizzate. Diventa fondamentale quindi il ruolo di Province e Comuni nell'ambito del controllo del territorio, con lo scopo di scongiurare l'eventuale sviluppo di incendi o altre criticità ambientali.



# Capitolo 3

## Incendio di materie plastiche

Nel presente capitolo, dopo un breve cenno ai principi fondamentali della combustione, si descriverà il fenomeno della combustione delle materie plastiche.

### 3.1 La combustione

Il termine combustione indica generalmente una reazione chimica di ossidazione rapida di una sostanza, che prende il nome di combustibile, con sviluppo di energia, generalmente sotto forma di calore e radiazione elettromagnetica.

In generale si indicano come combustioni le reazioni di ossidazione che avvengono con l'ossigeno, che prende il nome di comburente.

Durante la reazione si ha quasi sempre lo sviluppo di fiamma e di fumo.

#### 3.1.1 *Tipologie di combustibili e triangolo del fuoco*

La combustione può avvenire a partire da combustibili solidi, liquidi o gassosi.

Il triangolo del fuoco rappresenta i tre elementi fondamentali che devono essere compresenti affinché la reazione abbia luogo:

- combustibile;
- comburente;
- fonte di innesco (calore).

#### 3.1.2 *La combustione completa ed incompleta*

Le reazioni di combustione sono delle reazioni comunemente costituite da schemi cinetici anche molto complessi.

I prodotti della combustione dipendono inevitabilmente dalla natura del combustibile e dalle condizioni di reazione. L'ossigeno e il combustibile si combinano infatti in proporzioni ben

definite, dette quantità stechiometriche, quando ciò avviene si parla di combustione completa.

Un esempio di reazione stechiometrica riguarda la combinazione tra il carbonio e l'ossigeno per formare anidride carbonica:



Analogamente l'idrogeno si combina con l'ossigeno per formare vapore acqueo con conseguente produzione di calore, secondo la formula:



Se invece durante la reazione vi fosse un eccesso di combustibile o una carenza di comburente, così come in caso di insufficienza d'ossigeno, ci troveremmo nel caso di combustione incompleta, o parziale. È in tali condizioni, ad esempio, che viene prodotto il monossido di carbonio secondo l'equazione che segue:



## 3.2 Materiali plastici

Il presente lavoro si concentra sulle tre tipologie di materie plastiche di seguito descritte, le quali possono potenzialmente rappresentare la maggior parte della componente dei depositi di rifiuti di materiali plastici. Per ogni materiale, verranno elencate le principali caratteristiche, gli usi più comuni, le sostanze dannose che si liberano durante la combustione ed un accenno dei loro effetti sull'organismo.

### 3.2.1 Polietilene (PE)

**Caratteristiche:** è il materiale polimerico più semplice ed anche il più diffuso; essenzialmente si tratta di una resina termoplastica, molto leggera, versatile ed economica. Una delle caratteristiche principali che possiede è l'elevata resistenza agli agenti chimici, all'acqua, alle soluzioni saline e agli acidi, alcali, alcool e benzina. Il Polietilene non assorbe liquidi, ma può essere intaccato solamente da acidi ossidanti, come l'acido Nitrico, l'acido solforico e dagli alogeni. Possiede inoltre un'elevata resistenza agli urti (anche a basse temperature), facilmente saldabile e, grazie al basso coefficiente d'attrito, presenta eccellenti proprietà se utilizzato come antiaderente. È uno dei materiali più comunemente utilizzati, in

effetti esso rappresenta circa il 40% del volume totale della produzione mondiale di materie plastiche.

Le principali caratteristiche sono:

- resistenza eccellente della corrosione e ai prodotti chimici;
- resistenza eccellente all'abrasione;
- resistenza agli urti;
- basso coefficiente d'attrito;
- facilmente saldabile;
- buona lavorabilità alle macchie utensili;
- stabilità dimensionale.

**Utilizzi comuni:** grazie alle sue proprietà di atossicità e di basso assorbimento d'acqua è largamente utilizzato nell'industria alimentare. È molto diffuso anche nei settori meccanico, chimico ed elettrico.

Uno degli usi classici del polietilene è la fabbricazione dei cosiddetti sacchetti "di plastica", come anche la produzione del "film estensibile" e del "film a bolle d'aria" (o pluriball).

È inoltre utilizzato per:

- impermeabilizzazioni edili generali;
- rivestimento interno di confezioni in cartone per alimenti (per esempio cartoni del latte);
- flaconi per il contenimento di detersivi o alimenti;
- giocattoli;
- pellicole alimentari;
- tappi in plastica;
- tubi per il trasporto di acqua e gas naturale;
- pellicola di rivestimento di cavi elettrici e telefonici;
- palloni stratosferici;
- mobili per il giardino;
- inserti per protesi di ginocchio.



Figura 5. (a) tappi in PE per bottiglie; (b) taniche in PE; (c) tubo in PE corrugato.

### 3.2.2 Polipropilene (PP)

**Caratteristiche:** è un materiale polimerico termoplastico, semicristallino, molto simile al PE, ma con ben più elevate proprietà di resistenza e rigidità, così come una maggior resistenza alle alte temperature. Grazie alle caratteristiche di non polarità, possiede un'ottima resistenza dal punto di vista chimico, soprattutto in presenza di soluzioni acquose contenenti sali, acidi e alcali forti.

Nonostante non abbia elevate proprietà meccaniche (basse resistenza a trazione, flessione, compressione ecc.) è un materiale abbastanza adatto ad essere saldato e, rispetto al Polietilene (PE) è più rigido e meno resistente agli urti. Grazie all'elevata resistenza agli acidi e alcali e per la superiore resistenza alla temperatura rispetto al PVC è largamente impiegato nella realizzazione di componenti per industria chimica galvanica e petrolchimica.

Principali caratteristiche del Polipropilene:

- elevate resistenze chimiche;
- facilità di lavorazione sia alle macchine utensili sia per la saldatura;
- buona resistenza alla temperatura.

**Utilizzi comuni:** Lo si può trovare in molti oggetti di uso comune, dagli zerbini agli scolapasta, oppure i cruscotti, i paraurti degli autoveicoli, nei tappi e nelle etichette delle bottiglie di plastica, le reti, le custodie dei CD/DVD, le capsule del caffè e nei bicchieri di plastica bianchi, solo per citare alcuni esempi. Il polipropilene è usato anche come isolante per cavi elettrici.



È inoltre utilizzato per:

- reti per zanzariere plissettate;
- tubi per acqua e gas;
- aeromodelli dinamici (velivoli leggerissimi);
- componenti per l'arredo;
- banconote;
- fibre tessili;

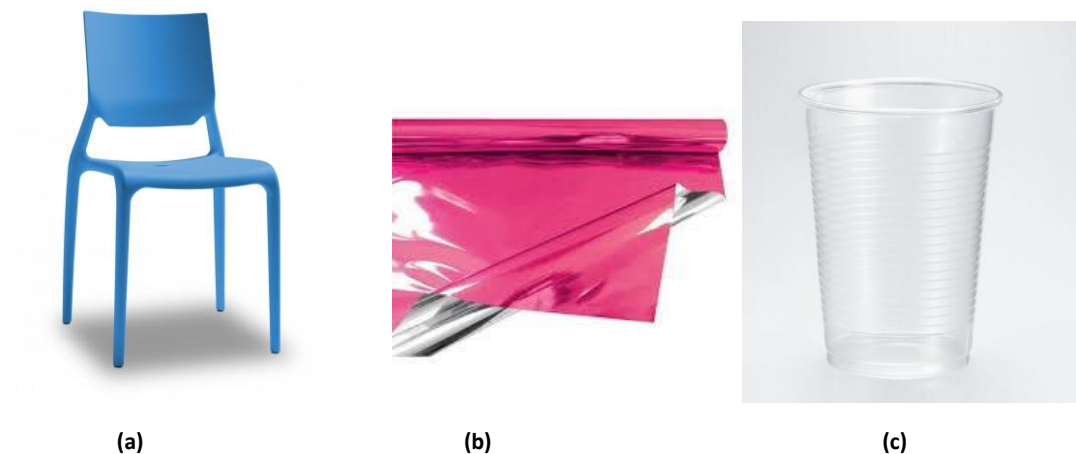


Figura 6. (a) sedia in PP; (b) film in PP; (c) bicchiere monouso in PP.

### 3.2.3 Polietilentereftalato (PET)

**Caratteristiche:** è essenzialmente una resina termoplastica, appartenente alla famiglia dei poliesteri, adatta al contatto con gli alimenti. A seconda del processo produttivo, può trovarsi in forma amorfa (trasparente) o semi-cristallina (bianca e opaca). Ha un basso coefficiente di attrito ed eccellente resistenza all'usura, ottime proprietà elettriche, di resistenza chimica ed alla temperatura; viene ampiamente utilizzato nei settori medico, farmaceutico, alimentare, della stampa, della logistica e dei trasporti, elettrici, elettronici e dei semiconduttori ed auto motive, soprattutto grazie alla sua rapidità di stampaggio.

Le principali caratteristiche sono:

- elevata resistenza meccanica, rigidità e durezza;
- basso e costante coefficiente d'attrito;
- buona resistenza all'usura;

- buona stabilità dimensionale;
- buone proprietà di isolamento elettrico;
- idoneo al contatto con alimenti.

**Utilizzi comuni:** il PET viene utilizzato perlopiù per la produzione di contenitori per cibi e bevande, infatti, il Regolamento UE n.10 del 14 gennaio 2011, ne sancisce la compatibilità con tutti i tipi di alimenti.

È inoltre utilizzato per:

- film;
- tubi;
- bottiglie;
- contenitori;
- etichette;
- pelli per batteria.



Figura 7. (a) contenitore monouso alimentare in PET; (b) varie tipologie di bottiglie in PET.

Si riporta di seguito Tabella 6, riassuntiva delle principali proprietà della combustione delle sostanze sopracitate.

Tabella 6. Tabella con le principali proprietà di combustione<sup>[6]</sup>.

Materiale	Proprietà			
	Densità	Conduttività	Calore specifico	Calore di combustione
U.M.	(kg/m <sup>3</sup> )	(W/m/K)	(kJ/kg/K)	(kJ/kg)
PE	860	0.29	3.50	10948
PP	910	0.24	2.68	10948
PET	1380	0.29	2.01	7854

### 3.3 Prodotti della combustione

I prodotti della combustione possono essere suddivisi in quattro categorie:

- fiamme;
- calore;
- fumi;
- gas/vapori.

Gas e vapori possono causare fastidio alla respirazione e possono avere un'interazione con i tessuti esterni e interni, con effetti che possono variare o peggiorare a seconda del tipo di sostanza e dei tempi di esposizione alla stessa. Durante la combustione, come già precedentemente accennato, si può sviluppare anidride carbonica e monossido di carbonio. Oltre a questi possono generarsi altri tipi di gas, che dipendono sostanzialmente dalla natura e dalla composizione chimica del materiale che sta bruciando.

Nel dettaglio:

- **Monossido di carbonio:** è un gas altamente tossico, presente in grande quantità negli incendi e principalmente nei luoghi chiusi con scarsa ventilazione.
- **Anidride carbonica:** contrariamente al caso precedente, si forma in grande quantità negli incendi all'aperto, dove la ventilazione è abbondante. Si tratta di un gas asfissiante che, in grande concentrazione, accelera il ritmo respiratorio.
- **Idrogeno solforato:** si sviluppa in presenza di incendi di materiali che contengono zolfo, come la lana, la gomma, le pelli, la carne, ecc. È immediatamente individuabile per via del caratteristico odore di uova marce che sparisce subito dopo le prime inalazioni. In percentuale superiore allo 0,07 % diventa molto pericoloso perché tossico, attacca il sistema nervoso provocando il blocco respiratorio.
- **Anidride Solforosa:** Anche questo composto si forma nella combustione di materiali che contengono zolfo e in presenza di una grande quantità di aria. Tuttavia, la quantità generata è molto modesta, salvo negli incendi dove sono coinvolte grandi quantità di zolfo. L'anidride solforosa è da considerarsi pericolosa già nella concentrazione dello 0,05 % anche per brevi esposizioni. È un gas irritante per le mucose, gli occhi e le vie respiratorie.
- **Ammoniaca:** si forma nella combustione di materiali che contengono azoto, come ad esempio materiali acrilici, fenolici, lana, seta, ecc. L'ammoniaca provoca

irritazioni agli occhi, al naso, alla gola ed ai polmoni; inalata in quantità di percentuale nell'aria pari allo 0,25 % - 0,65 %, può addirittura provocare la morte.

- **Acido cianidrico:** si sviluppa generalmente negli incendi con combustione della seta, lana, resine acriliche, uretaniche e poliammidiche quando l'ossigeno è scarso. È un gas molto tossico, ha un odore caratteristico di mandorle amare e la sua concentrazione nell'aria pari allo 0,3 % è da ritenersi mortale.
- **Acido cloridrico:** si genera quando bruciano materiali contenenti cloro, come ad esempio il PVC. Si avverte la sua presenza per il caratteristico odore pungente con effetto irritante per le mucose. Una concentrazione in aria pari a 1500 p.p.m. risulta fatale in pochi minuti.
- **Perossido di azoto:** si genera dalla combustione della nitrocellulosa e di altri nitrati organici. È un gas di colore rosso-bruno, altamente tossico che, in concentrazione nell'aria pari allo 0,02 % - 0,07 % può addirittura essere mortale.
- **Fosgene:** si forma nelle combustioni di materiali che contengono cloro, come ad esempio i materiali plastici. È un gas altamente tossico, da temere specialmente quando la combustione si verifica in ambienti chiusi. Se entra in contatto con umidità od acqua il fosgene si scinde in acido cloridrico ed anidride carbonica; è intensamente caustico e può raggiungere le vie respiratorie.
- **Diossine:** si generano quando la combustione coinvolge materie plastiche, solventi e pesticidi. Le diossine sono delle sostanze altamente tossiche. I loro effetti verranno analizzati successivamente.
- **Idrocarburi policiclici aromatici (IPA):** si tratta di un gruppo di oltre 100 composti chimici rilasciati nell'ambiente durante la combustione, che possono causare danni anche gravi all'organismo. Nei paragrafi successivi tali effetti verranno approfonditi.

### 3.3.1 Le Diossine

Con il termine generico di “diossine” si indica un gruppo di 200 composti chimici aromatici formati da carbonio, idrogeno, ossigeno e cloro, divisi in due famiglie:

- dibenzo-p-diossine (PCDD o propriamente “diossine”)
- edibenzo-p-furani (PCDF o “furani”).

Si tratta di idrocarburi aromatici clorurati, per lo più di origine antropica, particolarmente stabili e persistenti nell'ambiente, tossici per l'uomo, gli animali e l'ambiente stesso.

Le diossine sono sostanze semivolatili, termostabili, scarsamente polari, insolubili in acqua, altamente liposolubili, estremamente resistenti alla degradazione chimica e biologica.

A differenza degli altri tipi di gas e vapori tossici che si generano durante gli incendi, il cui effetto tossico è temporalmente legato alla presenza della nube tossica, per le diossine il discorso è diverso. Una volta dissolta la nube infatti, le diossine, si depositano sulle piante, sul suolo e nelle acque, vengono ingerite dunque dalla fauna e di conseguenza entrano a far parte della catena alimentare, fino ad arrivare all'uomo.

#### 2.4.1.1 Effetti sulla salute umana

L'uomo risulta notevolmente esposto alle conseguenze derivanti dalla presenza di diossine nell'ambiente anche a concentrazioni bassissime. Questo è dovuto, in parte, anche al fenomeno del bioaccumulo all'interno dell'organismo umano.

Per bioaccumulo si intende il fenomeno di accumulo irreversibile di una sostanza nei tessuti degli organismi viventi. È un parametro utilizzato, indirettamente, per la determinazione degli effetti tossici delle diossine, in quanto può fornire una stima del reale livello di contaminazione degli organismi.

La diossina è stata riconosciuta come agente cancerogeno per l'uomo (classificata gruppo 1) dall'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC). L'esposizione provoca danni al fegato, è irritante per gli occhi, la cute e il tratto respiratorio. La sostanza può determinare effetti, anche in tempi ritardati rispetto all'esposizione, sul sistema cardiovascolare, sul tratto gastrointestinale, sul fegato, sul sistema nervoso e sul sistema endocrino. Contatti ripetuti o prolungati con la cute possono causare dermatiti.

L'azione delle diossine può essere particolarmente dannosa durante lo sviluppo fetale, al momento cioè della differenziazione tissutale del sistema immunitario, determinando alterazioni a lungo termine, sia in senso immunodepressivo che ipersensibilizzante.

Le diossine vengono inoltre classificate tra i modulatori endocrini, ossia quelli agenti che interferiscono con produzione, rilascio, trasporto, metabolizzazione, legame, azione o eliminazione di ormoni naturali del corpo, responsabili del mantenimento dell'omeostasi (situazione che consente di mantenere in uno stato di equilibrio biochimico dinamico le

condizioni di vita dell'ambiente interno del nostro organismo) e della regolazione dei processi riproduttivi e di sviluppo.

Può inoltre causare danni nei feti esposti durante la fase gestazionale, in particolare sullo sviluppo del sistema nervoso e sull'equilibrio ormonale della tiroide.

### 3.3.2 *Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)*

Con il termine IPA si comprendono diversi composti organici con due o più anelli aromatici condensati tra loro. Anche se esistono più di cento diversi IPA, quelli più imputati nel causare dei danni per la salute dell'uomo e degli animali sono:

- l'acenaftene;
- l'acenaftilene;
- l'antracene;
- il benzo( $\alpha$ )antracene;
- il dibenzo(a,h)antracene;
- il crisene;
- il pirene;
- il benzo(a)pirene;
- l'indeno(1,2,3-c,d)pirene;
- il fenantrene;
- il fluorantene;
- il benzo(b)fluorantene;
- il benzo(k)fluorantene;
- il benzo(g,h,i)perilene;
- il fluorene.

Le proprietà chimico-fisiche degli IPA sono legate alle coniugazioni degli elettroni  $\pi$  e variano con il numero degli anelli e il peso molecolare.

Come nel caso delle diossine, anche la presenza degli IPA, va valutata sul lungo periodo, essi infatti a temperatura ambiente sono allo stato solido. Hanno un elevato punto di fusione e di ebollizione, unitamente ad una scarsissima solubilità in acqua. Sono invece solubili nella maggior parte dei solventi organici e sono molto lipofili (si sciolgono facilmente negli olii e nei grassi). A temperatura ambiente tutti gli IPA sono allo stato solido.

Come già detto si formano per la combustione incompleta, oltre che di materie plastiche, anche di materiale organico contenente carbonio, come carbone, legno o rifiuti. Il meccanismo di formazione, detto *Craking*, è assai complesso e consiste sostanzialmente nella ripolimerizzazione di frammenti di idrocarburo durante la reazione di combustione.

Gli IPA più leggeri, in genere rimangono in forma gassosa quando sono immessi nell'atmosfera, per poi cominciare a degradarsi dopo circa 24 ore, mentre quelli più pesanti, non permangono a lungo nell'atmosfera sotto forma di gas e tendono ad essere condensati e ad essere adsorbiti dalle particelle di cenere e fuliggine che si vanno a depositare sul terreno, le piante e le acque superficiali.

### **Effetti sulla salute umana**

L'esposizione, oltre che per inalazione, può avvenire anche per ingestione di cibo o di bevande contaminate, oppure per via cutanea, semplicemente toccando il terreno contaminato o i prodotti che li contengono.

Una volta nel corpo gli IPA si diffondono rapidamente per la loro liposolubilità che li rende in grado di attraversare le membrane cellulari e di penetrare e depositarsi nei tessuti adiposi. Gli organi target includono i reni, il fegato ed il grasso. La metabolizzazione è, però, abbastanza rapida e, nel giro di pochi giorni, gli IPA vengono eliminati tramite le urine e le feci.

La presenza degli IPA nell'atmosfera rappresenta un problema per la salute delle persone, in quanto molti di essi si sono rilevati cancerogeni.

L'esposizione a tali sostanze comporta vari danni a livello ematico, immunosoppressione e vari danni al sistema polmonare. L'effetto principale è la possibilità di causare il cancro, infatti dai vari test di laboratorio, risultano essere in grado di causare il cancro per inalazione (ai polmoni), per ingestione (allo stomaco) e per contatto dermico (alla pelle).

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (AIRC) ha inserito tra i probabili cancerogeni per l'uomo il benzo(a)pirene, il benz(a)antracene e il dibenz(a,h)antracene. Sono invece ritenuti cancerogeni il benzo(b)fluorantene, il benzo(k)fluorantene e l'indeno(1,2,3,-c,d)pirene.

Va comunque segnalato che non vi è niente di certo sull'azione cancerogena dei singoli IPA presenti all'interno di miscele complesse.

### **3.4 Monitoraggio ambientale**

Il monitoraggio ambientale a seguito di un incendio è un'attività che, proprio a causa della natura imprevedibile dell'evento, risulta impossibile da programmare. Un altro fattore che rende difficoltoso definire a priori un protocollo standard di monitoraggio, riguarda la molteplice varietà di sostanze che possono essere coinvolte nell'incendio, così come le specificità territoriali in cui si verificano.

A tal proposito sono state individuate due fasi dell'attività di monitoraggio connesse all'evoluzione dell'incendio.

#### **1° Fase: incendio attivo**

La prima fase coincide con la gestione dell'incendio fino a spegnimento; la durata solitamente limitata a poche ore o al massimo qualche giorno, pertanto risulta difficile effettuare un monitoraggio della qualità dell'aria durante l'evento. La segnalazione dell'evento molto spesso non è immediata, così come il tempo necessario per la preparazione, il trasporto e l'installazione di eventuali campionatori in un luogo idoneo, che sia custodito e provvisto di alimentazione elettrica. Nei casi in cui la durata dell'evento è compatibile con i tempi per l'avvio di una rilevazione, è possibile effettuare il monitoraggio della qualità dell'aria attraverso la raccolta di dati e indicazioni utili alla verifica dello stato rispetto dei limiti di legge fissati dal d.lgs. n.155/2010 e s.m.i., che prevede valori di riferimento espressi come medie orarie, medie massime di otto ore, medie giornaliere e medie annuali.

#### **2° Fase: incendio spento**

La seconda fase è solitamente avviata non appena l'incendio viene domato; nei casi in cui l'evento sia stato di durata e dimensioni significativi, è possibile anche realizzare uno studio modellistico con il quale vengono individuate le aree che con maggiore probabilità sono state interessate dalle ricadute al suolo degli inquinanti. Sulla base di tali studi, è possibile trovare i punti più idonei per l'installazione di campionatori passivi ed effettuare un campionamento del terreno superficiale e di eventuali sostanze vegetali.

Nel caso invece di eventi di limitate dimensioni, la simulazione modellistica difficilmente viene effettuata, ma può essere comunque previsto il campionamento del terreno



superficiale, pertanto è prevista l'installazione di campionatori passivi nell'area limitrofa all'incendio.

### ***3.4.1 Normativa di riferimento per il monitoraggio ambientale***

La normativa di riferimento per la tutela della qualità dell'aria affronta la tematica secondo due aspetti fondamentali:

- 1) tramite il controllo delle emissioni dalle fonti inquinanti, attraverso limiti di emissione;
- 2) individuando degli obiettivi di qualità dell'aria e valuta predisponendone il monitoraggio e fissando standard di qualità, con metodi e criteri comuni, allo scopo di proteggere la salute umana e l'ambiente nel suo complesso.

Tali obiettivi e standard di qualità sono indicati nel D.Lgs. n° 155 del 13/8/2010 e s.m.i. (D.Lgs. n° 250/2012) in cui trovano attuazione la Direttiva 2008/50/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 21/5/2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, e le nuove disposizioni di attuazione nazionale della Direttiva 2004/107/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 15/12/2004, concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nickel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente.

Il decreto nello specifico:

- regola la gestione della qualità dell'aria, andando a definire i valori limite, valori obiettivo, obiettivi a lungo termine, soglie di informazione e di allarme, livelli critici, obbligo di concentrazione e obiettivo di riduzione delle esposizioni per gli inquinanti aerodispersi;
- indica gli strumenti con cui deve essere effettuata la valutazione della qualità dell'aria, la zonizzazione e la classificazione del territorio, la rilevazione ed il monitoraggio dei livelli di inquinamento atmosferico effettuati mediante reti di monitoraggio e l'impiego di tecniche modellistiche, l'inventario delle emissioni e gli scenari emissivi;
- indica, in caso di superamento dei vari valori limite, le competenze (Regioni, Province autonome, Stato) e le modalità affinché siano intraprese misure necessarie

per agire sulle sorgenti di emissione in modo da rientrare negli standard e gli obiettivi,

- disciplina l'attività di comunicazione necessaria per informare il pubblico in modo adeguato e tempestivo sulla qualità dell'aria.

Si riportano di seguito i valori limiti per la protezione della salute umana imposti dal D.lgs. n.155/2010. Tali valori limite sono riferiti sempre ad un arco temporale pari ad un anno civile.

- PM10: valore limite di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per le concentrazioni medie giornaliere, non superabile per più di 35 volte nell'anno; valore limite  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media annuale.
- PM2.5: valore limite  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media annuale da raggiungere entro il 2015. A partire dal 2009 è applicato un margine di tolleranza decrescente secondo un percentuale annua costante e tale da annullarsi il 2015. Nell'anno 2014 il valore limite incrementato del margine di tolleranza è pari a  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- NO2: valore limite di  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per le concentrazioni medie orarie da non superare più di 18 volte nell'anno civile; valore limite  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media annuale.
- O3: valore limite di  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media oraria che rappresentano rispettivamente soglia di informazione e di allarme; valore limite di  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  come massimo giornaliero della media mobile su 8 ore da non superare più di 25 volte nell'anno.
- SO2: valore limite  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  delle concentrazioni medie orarie; valore limite  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media giornaliera da non superare più di 3 volte nell'anno.
- CO: valore limite di  $10 \text{mg}/\text{m}^3$  come massimo giornaliero della concentrazione media mobile su 8 ore.
- Benzene: valore limite di  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per la concentrazione media annuale.

# Capitolo 4

## Fire Dynamics Simulator

Nel capitolo in esame si farà un breve cenno ai principi dell'ingegneria antincendio per poi introdurre i modelli utilizzati per la simulazione dell'incendio. Verrà introdotto il software FDS, con un focus sul modello di dispersione che utilizza.

### 4.1 Fire Safety Engineering

La *Fire Safety Engineering (FSE)* o meglio l'ingegneria della sicurezza antincendio è uno strumento di valutazione della sicurezza di un edificio o di un'attività. Si basa sull'applicazione di principi ingegneristici, regole e giudizi di esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzata alla protezione delle persone, dei beni e dell'ambiente.

Lo scopo è quello di ottenere una valutazione analitica e quindi quantitativa del livello di sicurezza presente.

Nella pratica gli obiettivi principali riguardano:

- progettazione di edifici particolari;
- ottimizzazione dei materiali da costruzione;
- definire piani di emergenza e di evacuazione delle strutture;
- investigare sulle cause d'incendio.

È possibile studiare il fenomeno degli incendi tramite la modellazione numerica, da studiare all'interno di un programma di calcolo.

Un modello di simulazione per rappresentare un incendio è quello che considera i modelli di campo (CFD = Computational Fluid Dynamics) in cui si utilizzano metodi agli elementi finiti e le equazioni di conservazione vengono risolte all'interno di una griglia tridimensionale di cubetti in cui sono divisi i compartimenti.

## 4.2 Fire Dynamics Simulator

*Fire Dynamics Simulator* (FDS) è un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) del flusso di fluidi derivanti da un incendio. Il modello risolve numericamente una forma approssimata delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per il flusso a bassa velocità, termicamente, con particolare attenzione al trasporto di fumo e calore dagli incendi.

Tali equazioni semplificate sono state sviluppate da Rehm e Baum allo scopo di focalizzare l'attenzione sui fenomeni d'incendio piuttosto che sugli altri fenomeni fisici che descrivono la fluidodinamica del sistema. Prendono il nome di “equazioni della combustione per bassi numeri di Mach”.

Il numero di Mach non è il numero che indica il rapporto tra la velocità del fluido e la velocità del suono: un flusso a basso numero di Mach, dunque, si trova in regime subsonico.

Le derivate parziali delle equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia sono approssimate come differenze finite e la soluzione viene aggiornata nel tempo su una griglia tridimensionale rettilinea. La radiazione termica viene calcolata utilizzando una tecnica a volume finito sulla stessa griglia del risolutore di portata. Le particelle lagrangiane sono utilizzate per simulare il movimento del fumo, lo scarico degli irrigatori e gli spruzzi di carburante.

Smokeview è un programma associato a FDS che produce immagini e animazioni dei risultati. Smokeview è in grado di visualizzare il fuoco e il fumo in modo abbastanza realistico. Attraverso i suoi rendering realistici tridimensionali, Smokeview è parte integrante del modello fisico, in quanto consente di valutare la visibilità all'interno di un compartimento antincendio in modi che i normali software di visualizzazione scientifica non possono.

## 4.3 File input di FDS

Le operazioni che svolge il programma si basano sul file input che gli viene assegnato. Si tratta di un file di testo in estensione “.fds”, nel quale sono contenute tutte le informazioni per la descrizione dello scenario di incendio. Tali informazioni, che verranno meglio descritte nel capitolo successivo, riguardano essenzialmente:

- 1) dimensioni della griglia, costituita da una o più mesh di celle uniformi. È fondamentale che tutti gli elementi creati abbiano dimensioni conformi alla griglia, in quanto gli oggetti più piccoli della dimensione della minima cella vengono approssimati o ignorati;
- 2) la geometria dello scenario, che è modellata secondo una successione di blocchi rettangolari;
- 3) ambiente circostante;
- 4) proprietà dei materiali;
- 5) caratteristiche della combustione;
- 6) output richiesti.

#### 4.3.1 Struttura del file

All'interno del file input è necessario organizzare i parametri secondo specifici gruppi, detti *Namelist group*, che rappresentano le classi dei parametri da inserire. I “Namelist” sono essenzialmente delle stringhe di comando in linguaggio *FORTRAN* e sono una sorta di parole chiave per la comprensione del file dati.

Ogni stringa di comando inizia con il carattere & e viene chiusa con lo slash (/), oltre il quale tutto ciò che viene scritto non viene letto dal programma, ma resta semplicemente uno spazio utile per eventuali commenti dell'utente.

Tutti i singoli comandi, appartenenti ad una stessa stringa, sono separati mediante una virgola e dallo spazio o dall'interruzione di linea.

Nella Tabella 7 sono riportati le istruzioni più comuni, tutte individuate per mezzo di una stringa composta sempre da 4 caratteri alfabetici:

Tabella 7. Elenco “Namelist” con descrizione dei gruppi per i files input di FDS<sup>[9]</sup>.

<b>Namelist</b>	<b>Descrizione</b>
<i>BNDF</i>	( <i>Boundary File Parameters</i> ) Informazioni per ottenere in output dei file relativi al contorno
<i>CLIP</i>	( <i>Clipping Parameters</i> ) Limiti di massimo e minimo
<i>CTRL</i>	( <i>Control Function Parameters</i> ) Parametri di controllo dell'andamento della simulazione

<b>Namelist</b>	<b>Descrizione</b>
<i>DEVC</i>	( <i>Device Parameters</i> ) Posizionamento di un dispositivo per monitorare una determinata variabile in una certa posizione: fornisce in output il valore misurato
<i>DUMP</i>	( <i>Output Parameters</i> ) Parametri relativi alla scrittura in output delle variabili
<i>HEAD</i>	( <i>Header Parameters</i> ) Intestazioni del caso studio
<i>HOLE</i>	( <i>Obstruction Cutout Parameters</i> ) Opzione per disegnare delle cavità all'interno di ostacoli
<i>HVAC</i>	( <i>HVAC System Definition</i> ) Definizione del sistema di condotti e di componenti
<i>INIT</i>	( <i>Initial Conditions</i> ) Condizioni iniziali del caso studio
<i>ISOF</i>	( <i>Isosurface Parameters</i> ) Impostazioni per disegnare in output in Smokeview delle isosuperfici per una determinata quantità
<i>MATL</i>	( <i>Material Properties</i> ) Proprietà dei materiali utilizzati
<i>MESH</i>	( <i>Mesh Parameters</i> ) Parametri relativi all'impostazione delle mesh che costituiscono il dominio di calcolo
<i>MISC</i>	( <i>Miscellaneous Parameters</i> ) Miscellanea di parametri di input, tra i quali le impostazioni delle condizioni ambientali
<i>MULT</i>	( <i>Multiplier Function Parameters</i> ) Moltiplicazione degli ostacoli seguendo uno schema regolare
<i>OBST</i>	( <i>Obstruction Parameters</i> ) Impostazione degli ostacoli presenti nel dominio di calcolo
<i>PART</i>	( <i>Lagrangian Particles</i> ) Definizione delle particelle o gocce lagrangiane
<i>PRES</i>	( <i>Pressure Solver Parameters</i> ) Parametri per impostare il solutore della pressione
<i>PROF</i>	( <i>Wall Profile Parameters</i> ) Creazione dei profili di output in prossimità di una parete solida
<i>PROP</i>	( <i>Device Properties</i> ) Definizione delle proprietà dei dispositivi
<i>RADI</i>	( <i>Radiation Parameters</i> ) Parametri relativi al modello di radiazione

<b>Namelist</b>	<b>Descrizione</b>
<i>RAMP</i>	( <i>Ramp Function Parameters</i> ) Rampe che fanno variare i parametri nel tempo
<i>REAC</i>	( <i>Reaction Parameters</i> ) Impostazione di reagenti e parametri per il modello di combustione
<i>SLFC</i>	( <i>Slice File Parameters</i> ) Traccia in output di piani di sezione ad una coordinata fissata per monitorare una determinata quantità
<i>SPEC</i>	( <i>Species Parameters</i> ) Specificazione di specie aggiuntive, oltre a quelle di default
<i>SURF</i>	( <i>Surface Properties</i> ) Proprietà di una determinata superficie
<i>TABL</i>	( <i>Table Parameters</i> ) Tabelle di dati per far variare nel tempo determinate quantità
<i>TIME</i>	( <i>Time Parameters</i> ) Impostazioni relative al tempo di simulazione
<i>TRNX, TRNY, TRNZ</i>	( <i>MESH Transformations</i> ) Trasformazioni della mesh per renderla non uniforme relativamente al passo di griglia
<i>VENT</i>	( <i>Vent Parameters</i> ) Parametri di superfici adiacenti ad ostacoli o alla parete solida
<i>ZONE</i>	( <i>Pressure Zone Parameters</i> ) Impostazioni per ciascuna zona di pressione

### 4.3 Output di FDS

FDS è in grado di calcolare la temperatura, la densità, la pressione, la velocità e la composizione chimica in ogni cella del dominio computazionale per ogni step temporale. È anche in grado di valutare la temperatura, il flusso termico, la velocità di perdita di massa e altre quantità d'interesse in corrispondenza di una qualunque superficie solida del dominio. Gli output solitamente richiesti per la fase gas sono:

- temperatura;
- velocità;
- concentrazione delle specie in fase gas (CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e vapore);
- stime della concentrazione dei fumi;

- pressione;
- velocità di rilascio del calore per unità di volume;
- il rapporto tra aria e combustibile;
- densità.

Quando si studiano le superfici solide, FDS è in grado di valutare ulteriori quantità, alcune associate al bilancio di energia tra la fase gas e quella solida, come:

- temperatura superficiale ed interna;
- flusso termico, sia radiativo che convettivo;
- velocità di combustione.

Vengono inoltre registrate da FDS le quantità globali all'interno del dominio, come:

- velocità di rilascio del calore (HRR);
- flussi di massa e di energia attraverso le aperture o i solidi;
- tempi di attivazione dei dispositivi eventualmente presenti (ad esempio sprinkler e rilevatori).

Tali quantità vengono salvate in files di testo elaborabili mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo, grazie al quale è eventualmente possibile tracciare i grafici dell'andamento temporale e/o spaziale delle grandezze d'interesse.

Altri dati di campo o di superficie di FDS sono invece rappresentati in forma grafica tramite Smokeview, un apposito programma che funziona in correlazione con FDS ed è in grado di visualizzare i fenomeni di incendio modellati. Smokeview permette di visualizzare il flusso animato di particelle, i contorni animati delle variabili, oltre ai contorni e alle tracce vettoriali di dati statici in qualunque parte del dominio ad un istante fissato.



# Capitolo 5

## Modellazione di incendi di rifiuti con FDS

Il presente capitolo si concentrerà sulla modellazione del fenomeno di combustione. Inizialmente si illustreranno le ipotesi e la procedura per l'implementazione dei modelli degli scenari da analizzare su FDS (*Fire Dynamic Simulator*). Verranno in seguito riportati i risultati ottenuti per ogni scenario analizzato.

### 5.1 Costruzione del modello

Lo scenario tipico considera un incendio in un deposito di rifiuti che coinvolga contemporaneamente una o più balle di dimensioni standard 1,6m x 1m x 1m di materiale plastico compattato, in stoccaggio nel deposito ed in attesa di ulteriori lavorazioni. Il deposito è considerato all'aperto, senza alcun tipo di confinamento.

#### 1) CONDIZIONI AMBIENTALI

Si considera un modello che simuli le condizioni di campo aperto, una superficie quadrata di 10.000 m<sup>2</sup>, che si sviluppa in altezza per 50 metri. Tale esigenza sposa esigenze di tipo numerico connesse alla stabilità della simulazione.

Tutti i calcoli di FDS devono essere eseguiti all'interno di un dominio costituito da volumi discretizzati. Ogni volume è composto da celle a forma di parallelepipedo, il numero delle quali dipende dalla risoluzione voluta dalla dinamica del flusso. Il “*Namelist*” che definisce il dominio computazionale è “*&MESH*”.

Si definisce una mesh il cui volume si estende di 100 m lungo la direzione *x* e *y* e di 50 metri lungo la direzione *z* del campo; il dominio risulta così suddiviso in cubi di lato pari a 50 cm.

Essendo lo scenario all'aperto, si considera un vento di 2,5 m/s, il dato è stato scelto in quanto media annuale della velocità del vento nella Regione Veneto alla quota di 25 m s.l.m., che soffia verso Ovest. La direzione del vento si considera costante, mentre il profilo del

vento si considera crescente con l'aumentare della quota altimetrica ( $z$ ). In prossimità del suolo il flusso dell'aria viene rallentato per un effetto meccanico a causa dell'attrito prodotto dalla presenza degli ostacoli quali edifici, colture, alberi, rocce, ecc. e per la condizione al contorno *no slip* (velocità nulla alla parete).

Tipicamente, l'intensità del vento varia molto rapidamente con la quota, soprattutto nei primi 50-60 m. Inoltre il profilo verticale della velocità ha carattere fortemente locale: varia generalmente da un sito all'altro e in base alle diverse direzioni indagate a causa dei differenti ostacoli e tipi di vegetazione presenti. Per tener conto di questo fenomeno si indica la rugosità del terreno ( $z_o$ ) che tiene conto non solo della conformazione orografica e topografica del terreno, ma anche di ciò che è presente nelle immediate vicinanze.

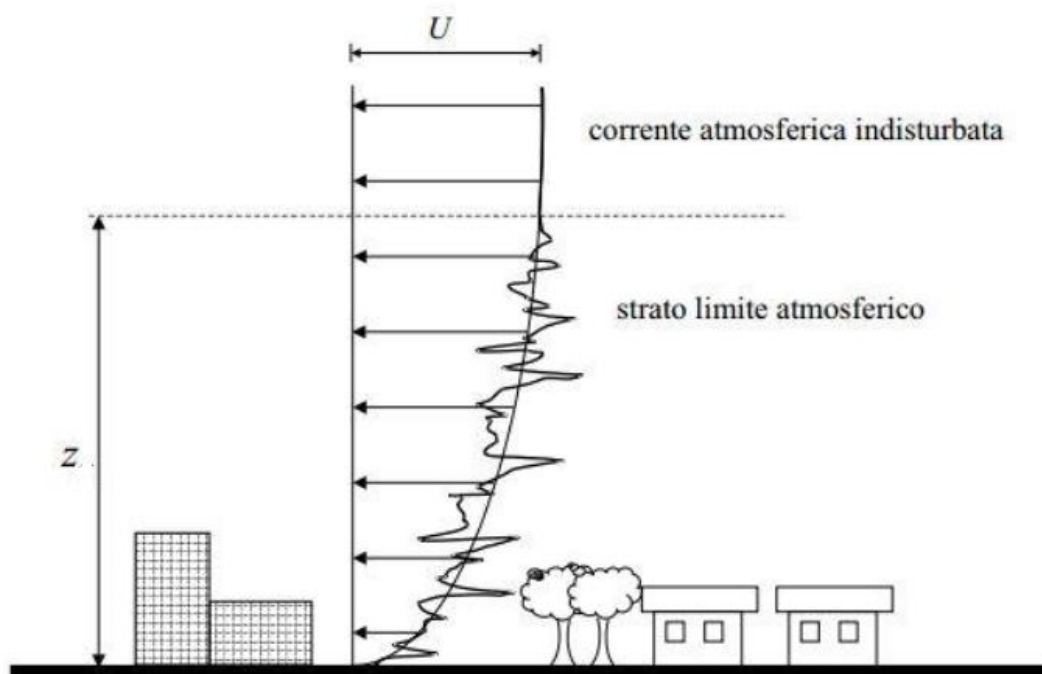


Figura 8. Andamento tipico dell'intensità del vento in funzione dell'altezza geodetica  $z$ .

Il valore della rugosità è stato assegnato secondo la classificazione di Davenport-Wieringa<sup>[9]</sup>, i cui valori, in funzione delle caratteristiche del terreno, sono riportati nella Tabella 8:

Tabella 8. Valori di  $z_0$  in metri, in funzione delle caratteristiche del terreno<sup>[9]</sup>.

$z_0$ (m)	Classification	Landscape
0.0002	sea	sea, paved areas, snow-covered flat plain, tidal flats, smooth desert
0.005	smooth	beaches, pack ice, snow-covered fields
0.03	open	grass prairie, farm fields, tundra, airports, heather
0.1	roughly open	low crops and occasional obstacles (single bushes)
0.25	rough	high crops, scattered obstacles such as trees or hedgerows, vineyards
0.5	very rough	mixed farm fields and forest clumps, orchards, scattered buildings
1.0	closed	suburbs, villages, forests
>2	chaotic	large towns and cities, irregular forests

È necessario definire anche la lunghezza di Obukhov ( $L$ ), un parametro che caratterizza la stabilità termica dell'atmosfera. Se il valore assunto è negativo, vuol dire che l'atmosfera si considera instabilmente stratificata, al contrario un valore di lunghezza di Obukhov positivo si riferisce ad un'atmosfera stabilmente stratificata. Gli effetti della stratificazione nell'atmosfera sono più forti nel caso in cui suddetto parametro assuma valori prossimi allo zero, al contrario, una lunghezza infinita di Obukhov corrisponde ad un'atmosfera neutralmente stratificata.

In generale, un'atmosfera instabile presenta una temperatura decrescente con altezza e fluttuazioni relativamente grandi nella direzione della velocità del vento.

Le atmosfere instabili sono fortemente influenzate dalle turbolenze generate dalla galleggiabilità, con conseguente miscelazione migliorata. Al contrario, le condizioni atmosferiche altamente stabili sopprimono la miscelazione turbolenta.

Nella Tabella 9 sono riportati i valori suggeriti della lunghezza di Obukhov in funzione della stratificazione atmosferica considerata:

Tabella 9. Valori di  $L$  in metri, in funzione della stratificazione atmosferica considerata, secondo *FDS User's Guide*<sup>[9]</sup>.

Valori della lunghezza di Obukhov ( $L$ )		
Stabilità atmosferica	Range di valori	Valore consigliato (m)
Molto instabile	$-200 \leq L < 0$	-100
Instabile	$-500 \leq L < -200$	- 350
Neutrale	$L > 500$	1000000
Stabile	$200 < L \leq 500$	350
Molto stabile	$0 < L \leq 200$	100

“Z\_REF” indica la quota dove termina lo strato limite atmosferico, ossia dove la velocità del vento raggiunge il valore massimo imposto per poi stabilizzarsi.

## **2) DURATA DELL'EVENTO**

Le condizioni che definiscono la durata dell'evento ed il tempo dello step iniziale vengono inserite mediante il *Namelist* “&TIME”. Il parametro che indica la durata è dato dal comando “T\_END”, mentre con il comando “T\_BEGIN” è possibile anche specificare il tempo di inizio della simulazione.

La durata degli incendi negli scenari considerati è stata impostata rispettivamente di:

- 10 minuti per gli Scenari 1 e 3;
- 20 minuti per gli Scenari 2 e 4.

## **3) GEOMETRIA E CARATTERISTICHE DELLE BALLE DI RIFIUTI**

Le balle di plastica provenienti dalla raccolta differenziata possono talvolta trovarsi ad essere temporaneamente stoccate nei depositi. Le dimensioni a cui si fa riferimento sono quelle standard delle balle di plastica compresse. Tale parametro verrà inserito nel file input di FDS utilizzando il comando “&OBST” con il quale si può costruire l'ambiente di simulazione. La geometria viene definita in termini di ostacoli verticali e orizzontali (ostruzioni = obstruction) che possono scaldarsi, bruciare, trasmettere calore ecc.; ogni ostruzione deve avere le proprie condizioni limite specificate, che ne descrivono le proprietà termiche. Tali condizioni sono attribuite attraverso il *Namelist* “&SURF”, un gruppo utile a definire la struttura delle superfici di tutti i solidi presenti nel dominio.

Il *Namelist* per definire le proprietà del materiale è “&MATL”; all'interno di esso sono definite le caratteristiche proprie del materiale che riguardano fondamentalmente la rapidità di riscaldamento e le modalità con cui brucia il materiale. Nello specifico:

- “DENSITY” è la densità del materiale, che nel nostro caso è data dalla media aritmetica della densità delle tre macro-categorie di materiali polimeri considerati (PE, PP e PET);
- lo stesso dicasi per i parametri “CONDUCTIVITY” e “SPECIFIC\_HEAT”, che rappresentano rispettivamente la conduttività termica del materiale e il calore

specifico. Anche per essi, il valore numerico assegnato è dato dalla media aritmetica dei valori relativi ai polimeri considerati.

Per determinare le caratteristiche dell'incendio, all'interno del gruppo “&SURF”, è necessario assegnare il valore di HRR, ossia il valore di *Heat Release Rate*, in italiano detto Curva di Rilascio Termico. Esso rappresenta la variazione della potenza di rilascio termico in una reazione di combustione, ed è espresso in kW. Più il valore di HRR è alto, più vuol dire che il materiale combustibile brucia velocemente e che la produzione di fumo e calore aumentano sensibilmente. In tal senso, a parità di calore rilasciabile, diversi combustibili potrebbero essere caratterizzati da HRR differenti che gravano sulla severità dei relativi scenari di incendio.

L'HRR viene rappresentato sul piano cartesiano, il cui tempo è riportato sull'ascissa.

La fase iniziale, di crescita dell'incendio, viene modellizzata considerando una legge quadratica in funzione del tempo, seguito da una fase stazionaria, o di pieno sviluppo dell'incendio. Con l'esaurirsi del combustibile, l'HRR inizia a decrescere. Nella Figura 10 si riporta una curva HRR generica.



Figura 10. Curve HRR generica.

Nel caso in esame, è stato possibile far riferimento ad una curva  $HRR(t)$  reale relativa ad una prova sperimentale eseguita su di un cubo di materiale plastico. La frazione merceologica utilizzata per la prova, è quella del Gruppo A (*Standard plastic*)<sup>[6]</sup>, molto simile a ciò che è

possibile trovare in una balla di plastica in un deposito. Nella Tabella 10 è riportato un estratto della tabella nella quale sono descritti tipi i materiali utilizzati nell'esperimento per realizzare il test.

Tabella 10. Descrizione dei prodotti utilizzati nel test per ricavare la curva HRR(t)<sup>[6]</sup>.

<b>Class</b>	<b>Products</b>	<b>Test commodity</b>
Standard plastic (Group A Plastic)	Commodities containing a greater amount of plastic than would be permitted in Class IV commodities.	Single-wall corrugated cardboard carton measuring 0,533 m on a side, divided into five horizontal layers by corrugated cardboard sheets. Each layer divided by interlocking corrugated cardboard partitions forming a total of 125 compartments. Each compartment occupied by one 16-oz polystyrene jar, without lids, open side facing down to prevent the collection of water. A pallet load consists of one wood pallet and eight of above described cartons.

Dall'esperimento condotto da Newmann<sup>[6]</sup>, risulta la curva di  $HRR(t)$  come in Figura 10.

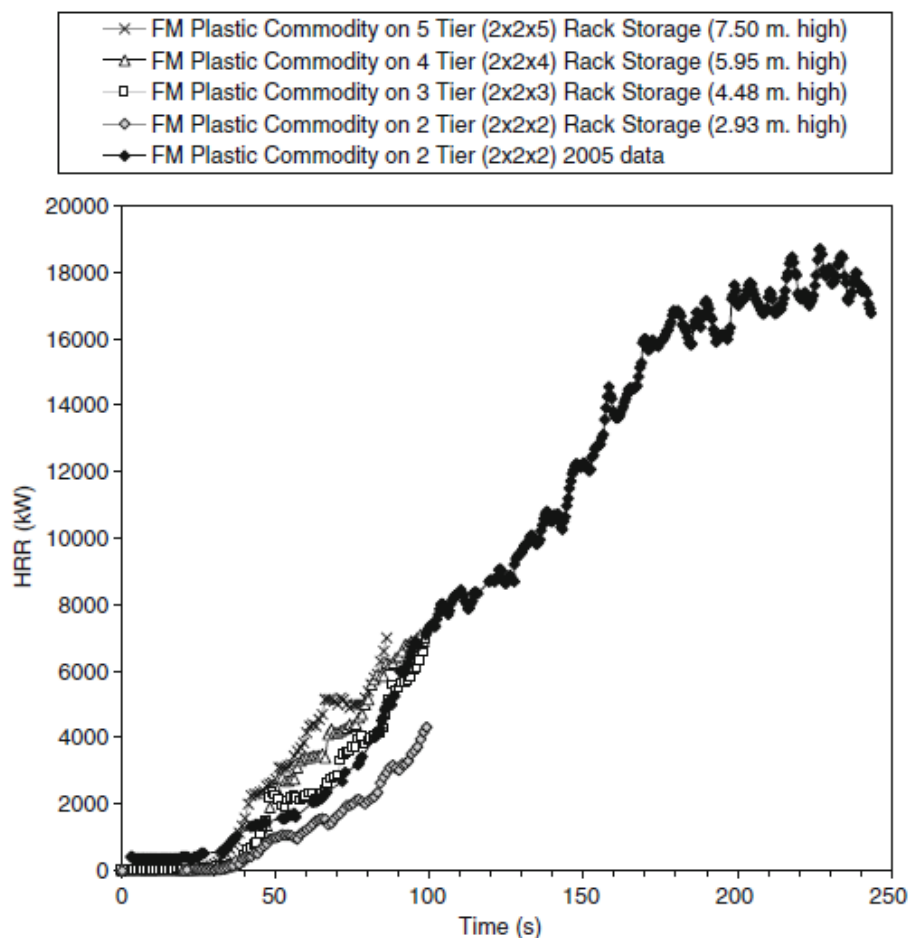


Figura 10. Curve HRR di Newman ricavate sperimentalmente per le diverse tipologie di materiali<sup>[6]</sup>.

Si nota immediatamente come il picco di HRR non viene istantaneamente raggiunto, ma ci si arriva dopo un tempo di circa 200 secondi, entro il quale valore cresce secondo un andamento quadratico in funzione del tempo. Essendo l'incendio all'aperto, finché le fiamme non sono estinte, difficilmente si andrà incontro ad una fase di decadimento naturale dell'incendio per carenza di ossigeno. È ragionevole pertanto considerare una curva di incendio sperimentale di questo tipo come rappresentazione del fenomeno.

In FDS è possibile definire un incendio di progetto assegnando un determinato valore  $HRR(t)$ .

Il caso più semplice è la definizione di un HRR costante nel tempo, dove basta definire il parametro " $HRRPUA$ " che corrisponde al calore rilasciato nell'unità di tempo per unità di volume (*Heat Release Rate Per Unit Area*) nella linea "&SURF". Tale stringa deve essere

poi associata ad un oggetto solido, definito tramite una linea di comando “&OBST”. L’oggetto brucerà secondo la reazione chimica definita tramite la linea di comando “&REAC” emettendo una potenza termica pari al prodotto del parametro *HRRPUA* per l’area della superficie alla quale è applicata la proprietà.

La curva sperimentale adottata, come già visto, non raggiunge istantaneamente il valore di picco di HRR. È quindi necessario definire, all’interno del file input di FDS, una funzione che tenga conto di questa dipendenza dal tempo. Per simulare un incendio con una curva HRR di tipo crescente, occorre definire il parametro “*TAU\_Q*” nella linea di comando “&SURF”. Tale parametro rappresenta la variazione della potenza termica nel tempo e serve per impostare una curva HRR variabile nel tempo con vari formati prefissati.

Una curva che abbia una fase di crescita del tipo  $HRR = \tanh(t/\tau)^{[9]}$ , può considerarsi ben rappresentativa dell’evento, avrà infatti un profilo come quello riportato in Figura 11.

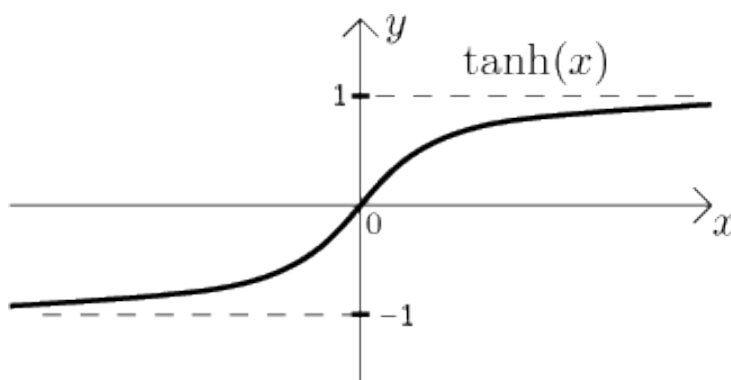


Figura 11. Grafico della tangente iperbolica.

Per impostare una curva di questo tipo occorre settare il parametro “*TAU\_Q*”, assegnando un valore, in secondi, di segno positivo.

#### 4) MODELLAZIONE DELLA COMBUSTIONE

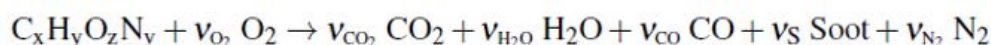
Esistono due modi per descrivere un incendio all’interno di FDS: il primo prevede che sia specificata la velocità di rilascio del calore per unità di area, mentre nel secondo è necessario specificare nella fase solida le proprietà termiche e di pirolisi dei materiali solidi. I vapori da essi liberati, infatti, contribuiscono ad iniziare e a sostenere la combustione.



FDS, nella forma più semplice di modellare la combustione, considera una sola specie di combustibile, composta da carbonio, idrogeno e azoto, che reagiscono con l'ossigeno in una sola fase di miscelazione controllata per formare:

- anidride carbonica (CO<sub>2</sub>);
- acqua (H<sub>2</sub>O);
- ossido di carbonio (CO);
- azoto (N<sub>2</sub>);
- fumo (SOOT),

La reazione chimica sarà quindi del tipo:



In tal senso si fa ricorso ad una formula bruta di composizione chimica che sia rappresentativa del combustibile che prende parte al fenomeno di incendio.

Questo approccio è valido se c'è una singola reazione da modellare in FDS. Quando invece si vogliono modellare delle reazioni multiple, diventa obbligatorio specificare le specie dei gas che partecipano alla reazione e la stechiometria della reazione stessa.

A partire dalla versione 6 di FDS, è necessario specificare la linea di comando “&REAC” per modellare la combustione. L'utente è quindi responsabile della definizione della chimica base del combustibile e delle rese a monossido di carbonio (CO) e fuliggine (Soot).

## 5) RESIDUI DELLA COMBUSTIONE

La combustione di un materiale non è mai ideale né tantomeno completa, motivo per il quale la reazione di combustione produce una serie di prodotti e sottoprodotti anche inquinanti e pericolosi. È necessario definire nel file input i parametri in modo da poter calcolare le concentrazioni delle specie chimiche a valle della reazione.

All'interno della stringa del *Namelist* “&REAC”, ovvero il gruppo dove vengono definite le caratteristiche della combustione, è possibile inserire tali parametri. Il comando “FUEL” assegna una tipologia di combustibile alla reazione, mentre i parametri “SOOT\_YIELD” e “CO\_YIELD”, rappresentano rispettivamente le frazioni massive del combustibile di massa convertita in particolato di fumo e la frazione di massa del comburente convertita in

monossido di carbonio. Si tratta di dati determinati sperimentalmente attraverso un campionamento dei fumi di combustione.

All'interno del gruppo viene inoltre definito il parametro "*HEAT\_OF\_COMBUSTION*", che rappresenta la quantità di energia rilasciata per unità di massa di combustibile consumato, specifico per ogni tipo di materiale.

Nella Tabella 11 sono riportati i valori sperimentali di alcune rese di combustione verso specifici prodotti per i polimeri considerati.

Tabella 11. Rese di combustione verso *soot*, monossido di carbonio e anidride carbonica, espresse in kg/kg<sup>[6]</sup>.

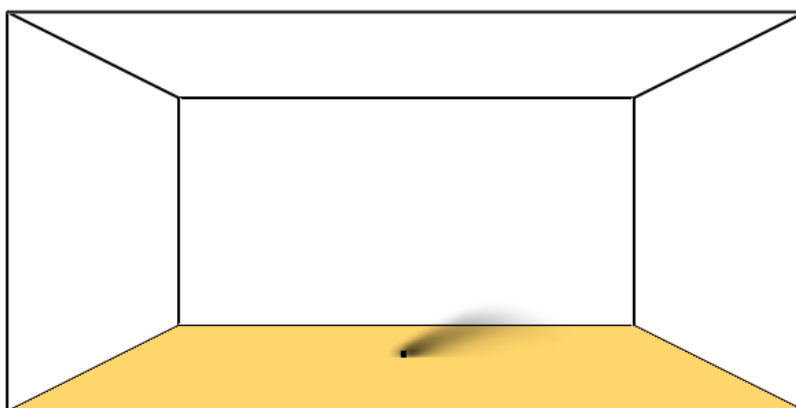
	Y <sub>s</sub>	Y <sub>CO</sub>	Y <sub>CO2</sub>
Materiale	kg/kg	kg/kg	kg/kg
PE	0.060	0.024	2.76
PP	0.059	0.024	2.79
PET	0.091	0.070	1.65

## 5.2 Scenario 1: Incendio di una pila di plastica mista.

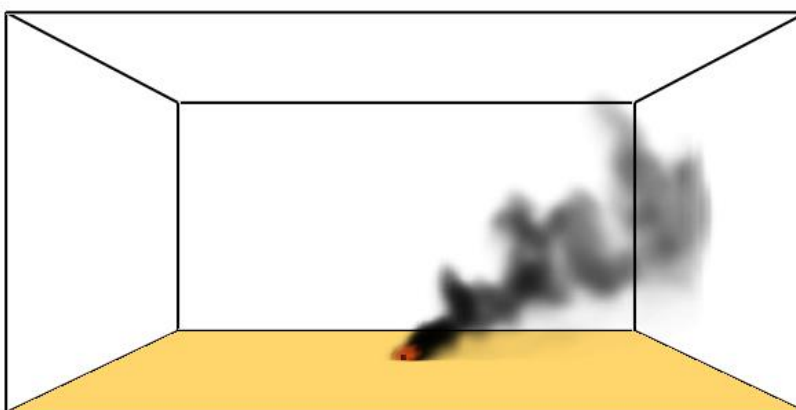
Una volta specificate le condizioni ambientali, è stata effettuata una prima simulazione considerando:

- una singola pila di materiale plastico compattato, composta da PE, PET e PP;
- durata dell'incendio pari a 10 minuti,
- la reazione di combustione, per semplicità di calcolo, si considera attivata da un combustibile;
- residui di combustione considerati mediati tra i 3 valori delle 3 materie plastiche.

### 5.2.1 Risultati



(a)



(b)

Figura 12. Render in 2 fasi della simulazione. (a) dopo 15 secondi (b) dopo 350 secondi.

I prodotti della combustione si riportano nelle figure successive.

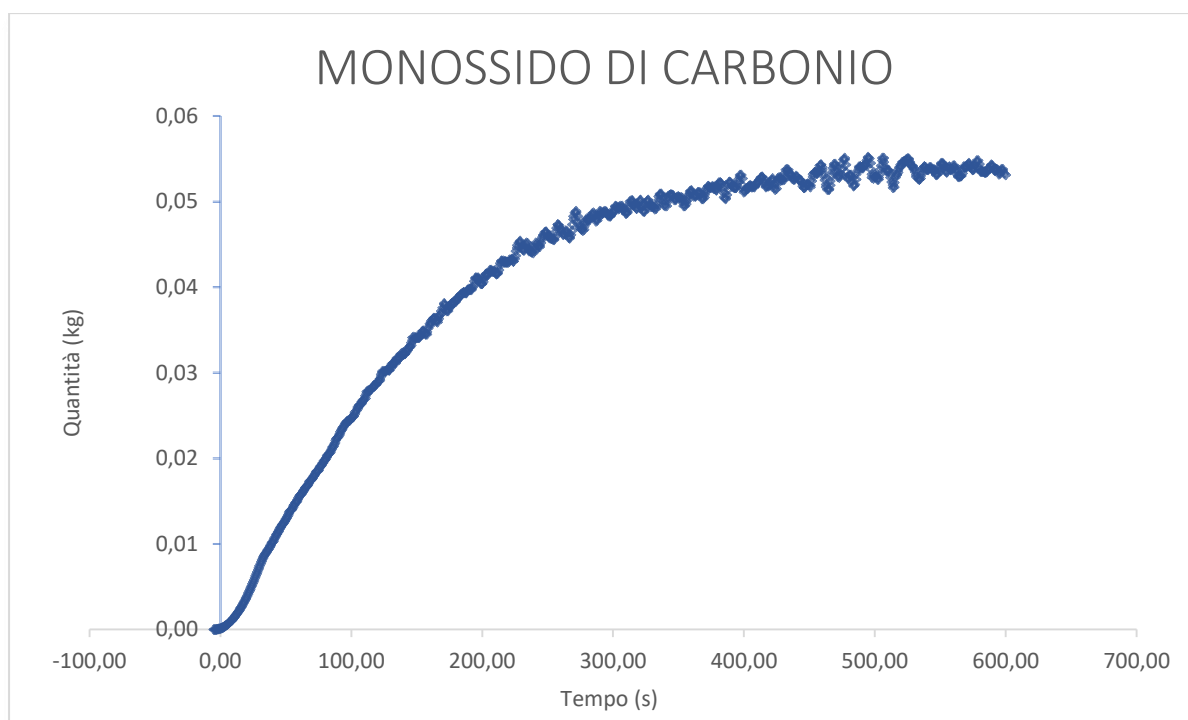


Figura 13. Curva della quantità di CO prodotta in funzione del tempo.

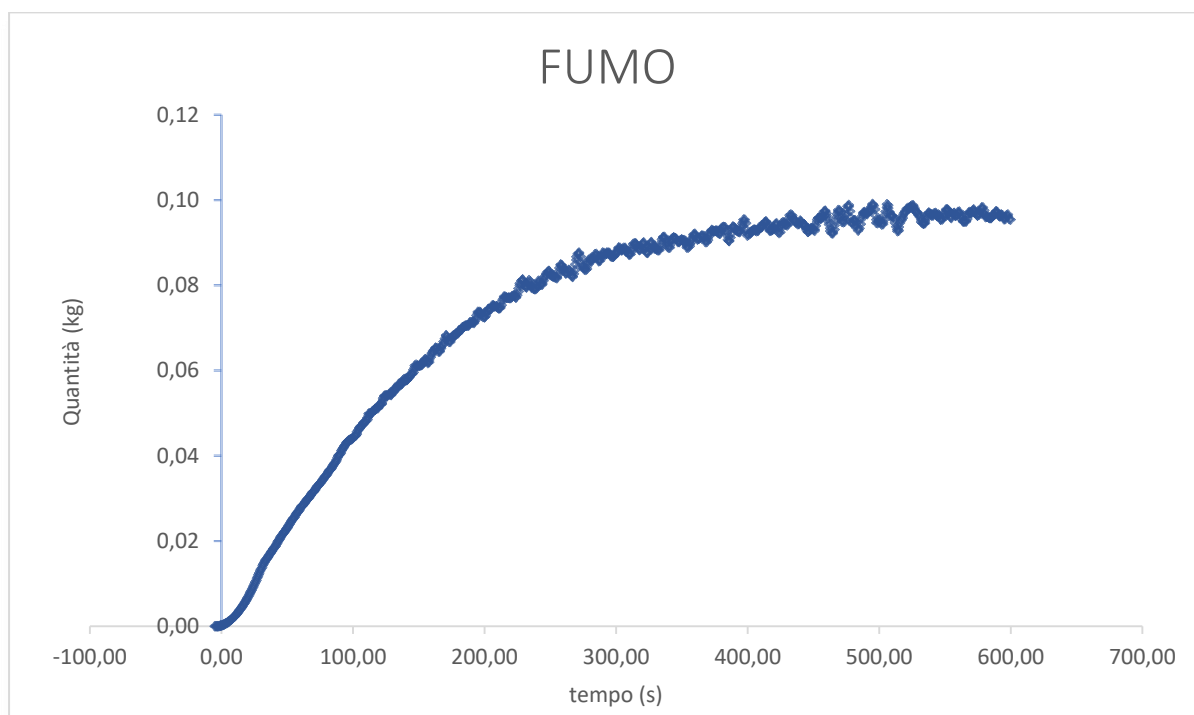


Figura 14. Curva della quantità di particolato di fumo prodotto in funzione del tempo.

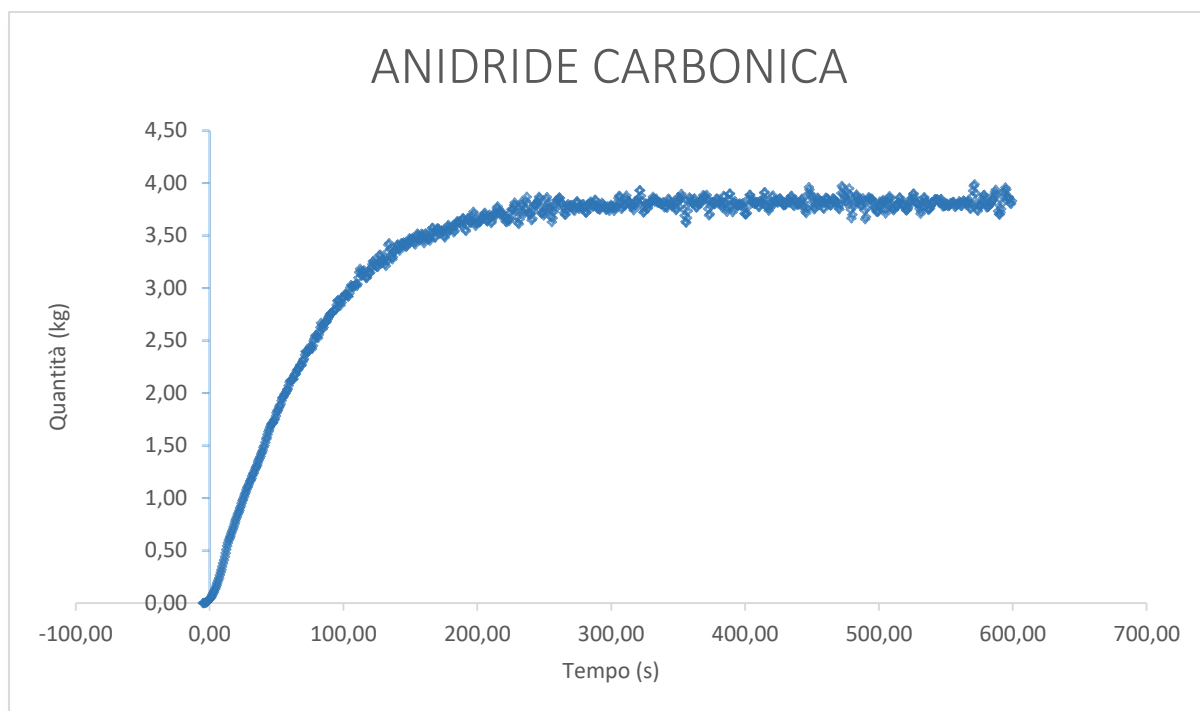


Figura 15. Curva della quantità di CO<sub>2</sub> prodotta in funzione del tempo.

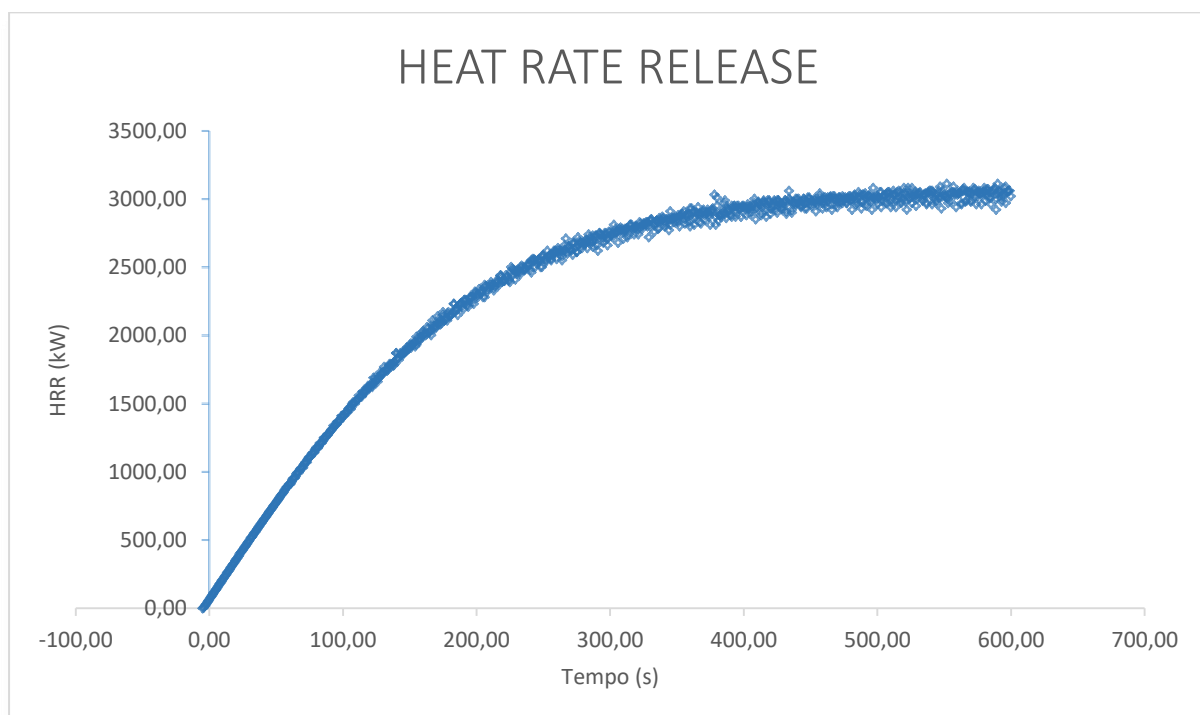


Figura 16. Curva di HRR(t) caratteristica dell'incendio.

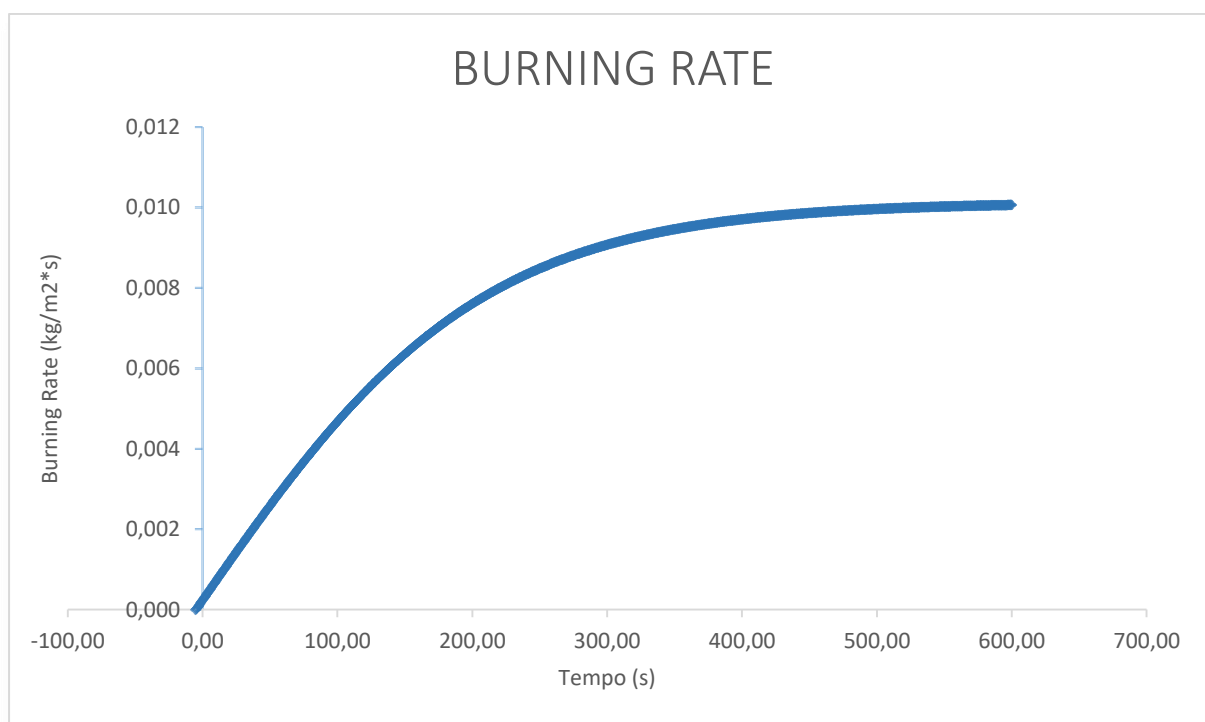


Figura 17. Curva della velocità della reazione di combustione.

Nella Tabella 12 sono riportati i risultati della simulazione del primo scenario. Si riportano rispettivamente i valori della media integrata nel tempo<sup>1</sup>, la media aritmetica ed il picco massimo registrato durante la simulazione per ogni prodotto della combustione considerato.

Tabella 12. Valori delle rese verso *soot*, CO<sub>2</sub> e CO, HRR e Burning Rate, caratteristiche dello scenario considerato.

SCENARIO 1	CO	SOOT	CO <sub>2</sub>	HRR	BURNING RATE
	kg/s	kg/s	kg/s	kW/s	kg/m <sup>2</sup> /s
Media integrata nel tempo	0.041	0.074	2.88	2320.58	0.0077
Media aritmetica	0.041	0.074	2.88	2320.94	0.0077
Picco massimo	0.055	0.099	3.88	3111.50	0.0100

I file eseguiti sono visibili in appendice B.1.

## 5.3 Scenario 2: Incendio di una pila di plastica mista.

Lasciate immutate le condizioni ambientali, è stata effettuata la seconda simulazione considerando:

- una singola pila di materiale plastico compattato, composta da PE, PET e PP;
- durata dell'incendio pari a 20 minuti,
- la reazione di combustione, per semplicità di calcolo, si considera attivata da un combustibile;
- residui di combustione considerati mediati tra i 3 valori delle 3 materie plastiche.

### 5.3.1 Risultati

I prodotti della combustione si riportano nelle figure successive.

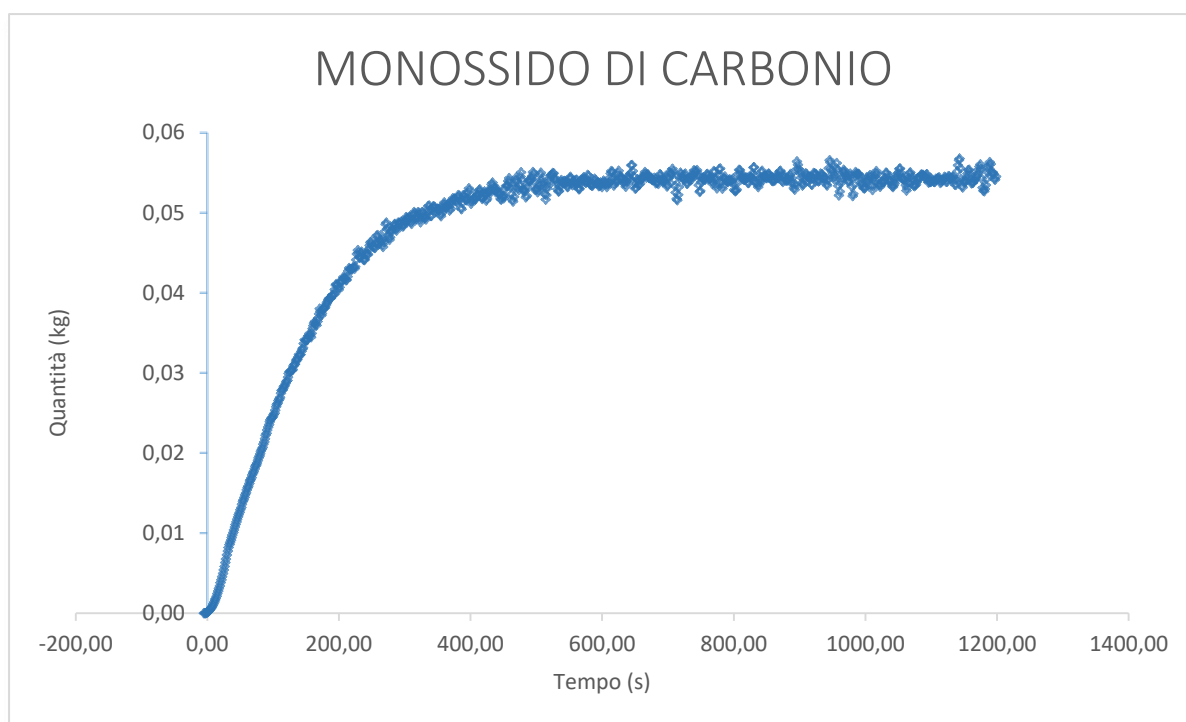


Figura 18. Curva della quantità di CO prodotta in funzione del tempo.

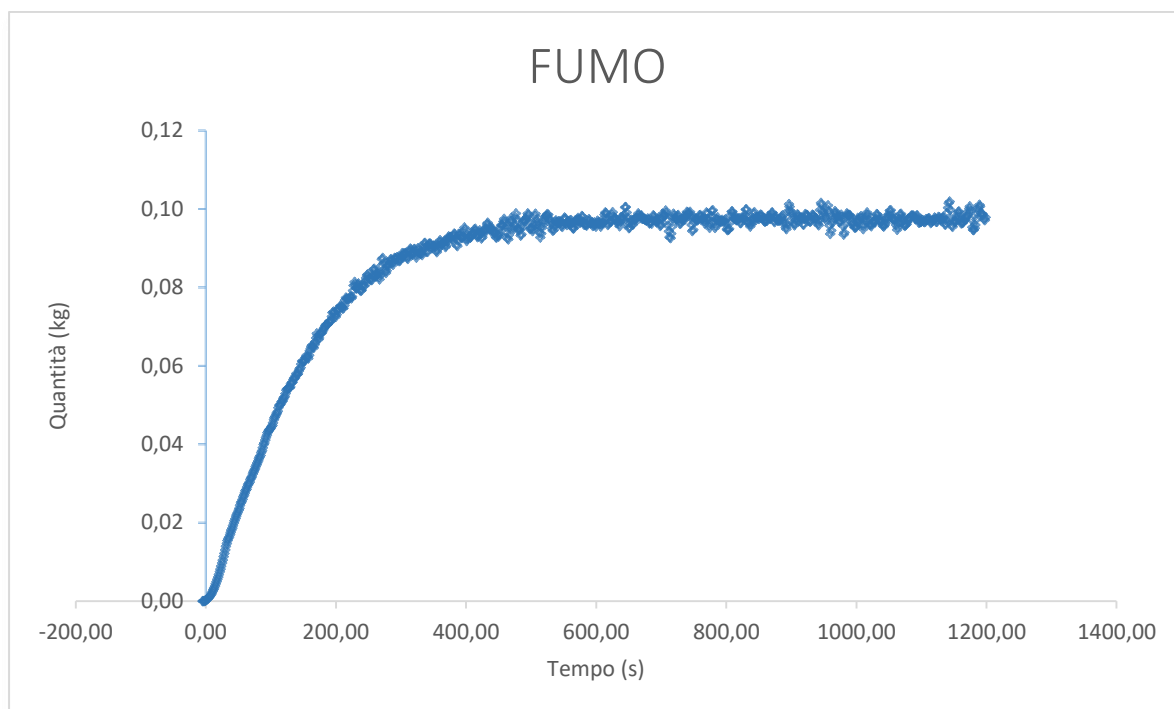


Figura 19. Curva della quantità di particolato di fumo prodotto in funzione del tempo.

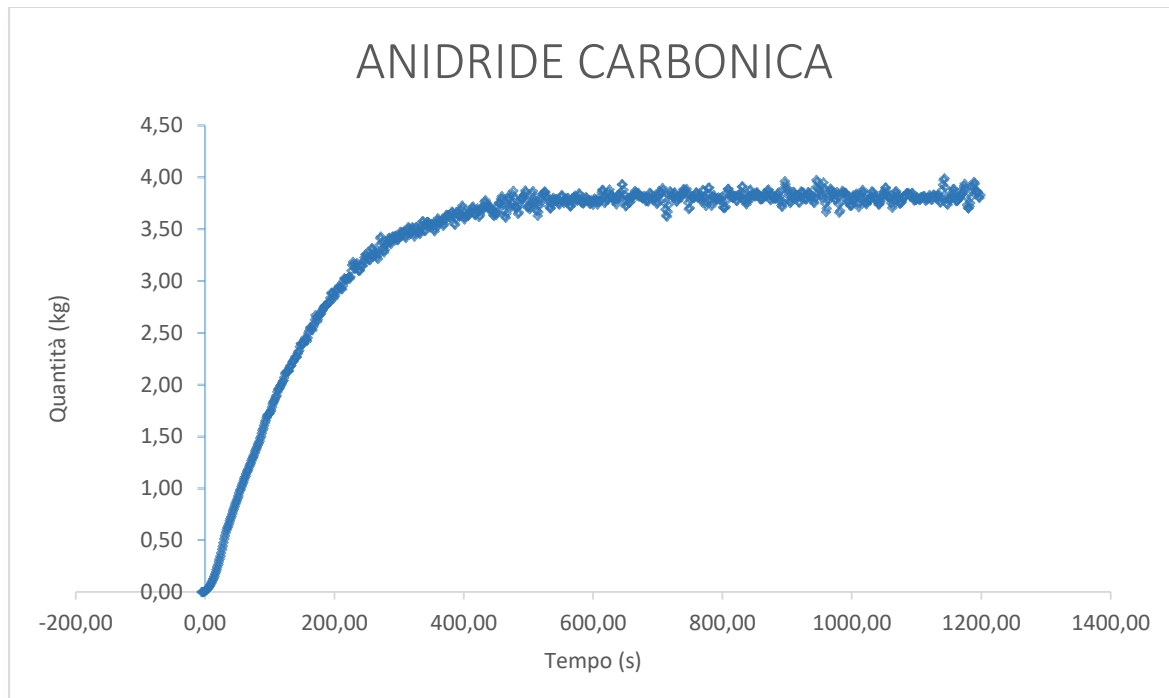


Figura 20. Curva della quantità di CO<sub>2</sub> prodotta in funzione del tempo.



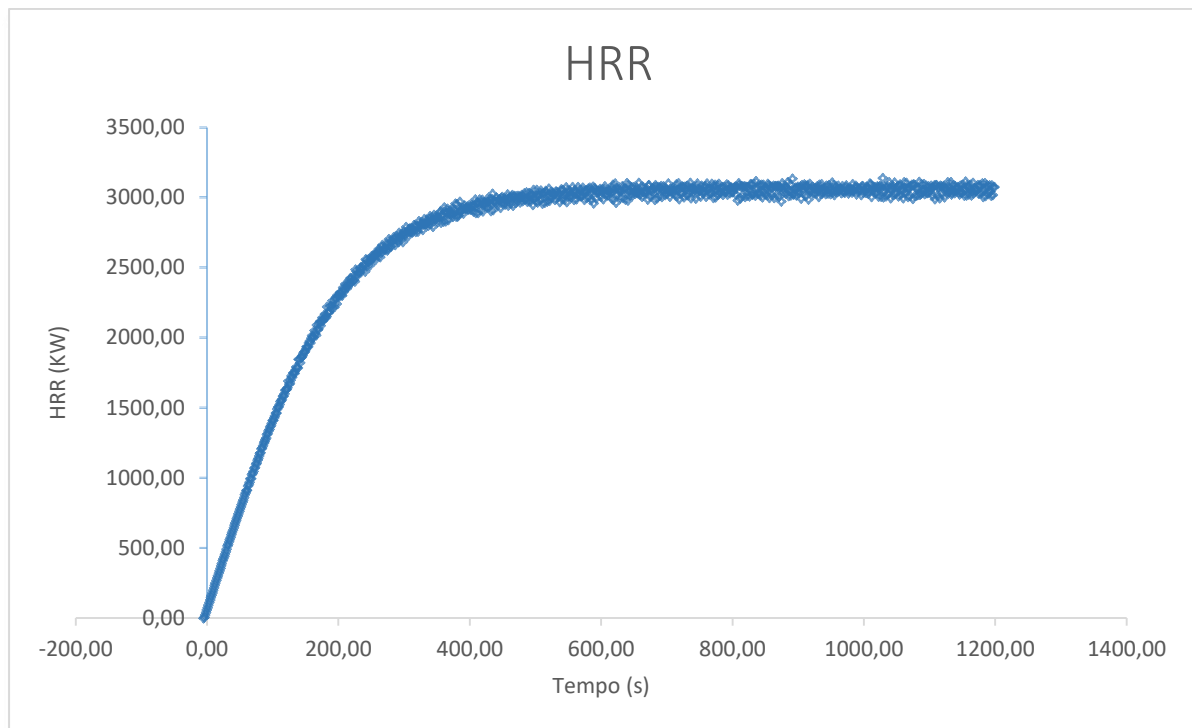


Figura 21. Curva di HRR(t) caratteristica dell'incendio.

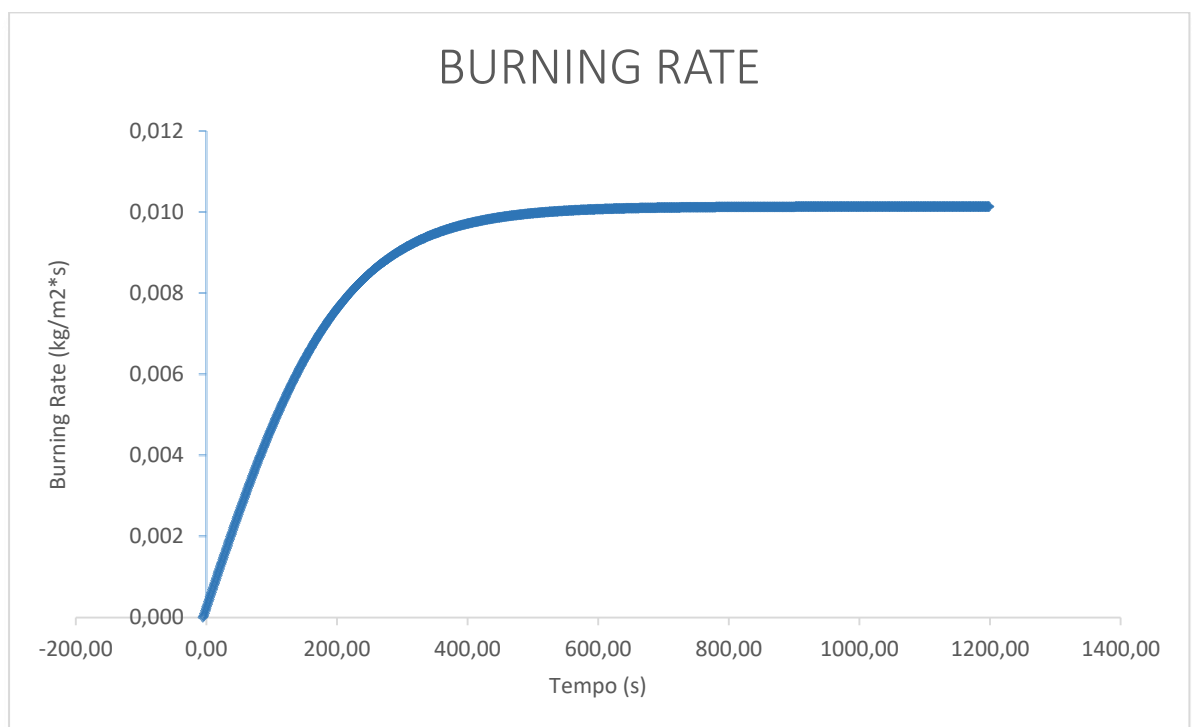


Figura 22. Curva della velocità della reazione di combustione.

Nella Tabella 13 sono riportati i risultati della simulazione del secondo scenario. Si riportano rispettivamente i valori della media integrata nel tempo<sup>1</sup>, la media aritmetica ed il picco massimo registrato durante la simulazione per ogni prodotto della combustione considerato.

Tabella 13. Valori delle rese verso *soot*, CO<sub>2</sub> e CO, HRR e Burning Rate, caratteristiche dello scenario considerato.

<b>SCENARIO 2</b>	<b>CO</b>	<b>SOOT</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>HRR</b>	<b>BURNING RATE</b>
	kg/s	kg/s	kg/s	kW/s	kg/m <sup>2</sup> /s
Media integrata nel tempo	0.048	0.085	3.34	2684.07	0.0089
Media aritmetica	0.048	0.085	3.34	2684.27	0.0089
Picco massimo	0.057	0.102	3.99	3138.86	0.0101

I file eseguiti sono visibili in appendice B.2.

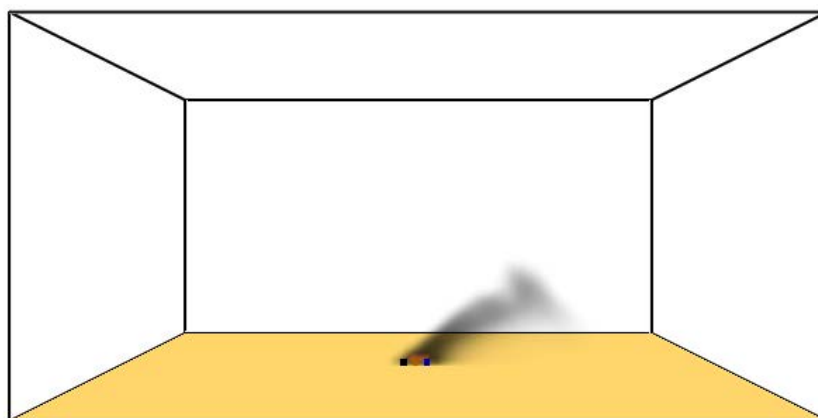
### 5.4 Scenario 3: Incendio di tre pile di plastica omogenee.

Lasciate immutate le condizioni ambientali, il terzo scenario di simulazione è stato svolto considerando:

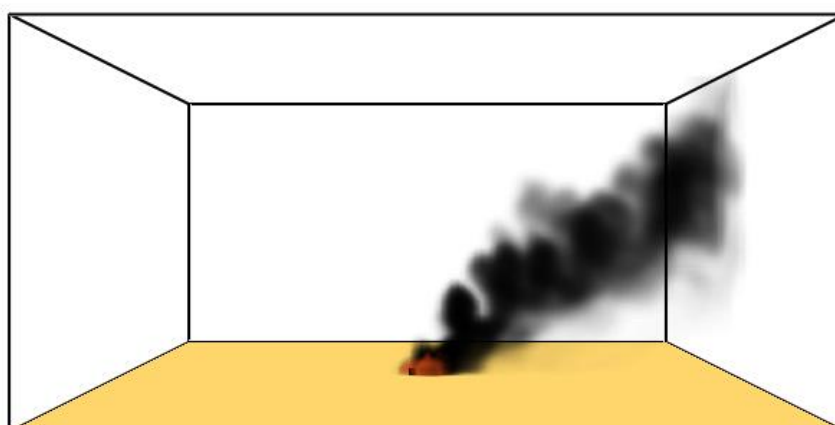
- tre pile di materiale plastico compattato, composte rispettivamente da PE, PET e PP;
- durata dell'incendio pari a 10 minuti;
- la reazione di combustione, per semplicità di calcolo, si considera attivata da un combustibile;
- residui di combustione considerati mediati tra i 3 valori delle 3 materie plastiche.

#### 5.4.1 Risultati

I prodotti della combustione si riportano nelle figure successive.



(a)



(b)

Figura 23. Render in 2 fasi della simulazione. (a) dopo 15 secondi (b) dopo 350 secondi.

I prodotti della combustione si riportano nelle figure successive.

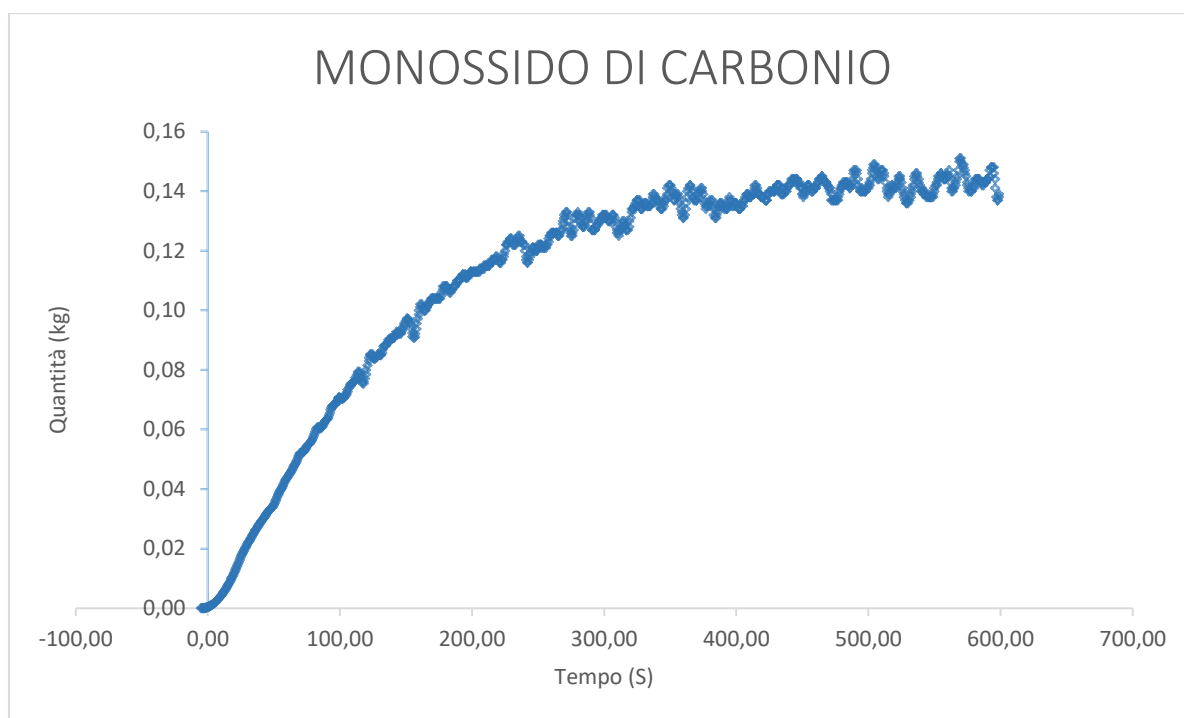


Figura 24. Curva della quantità di CO prodotta in funzione del tempo.

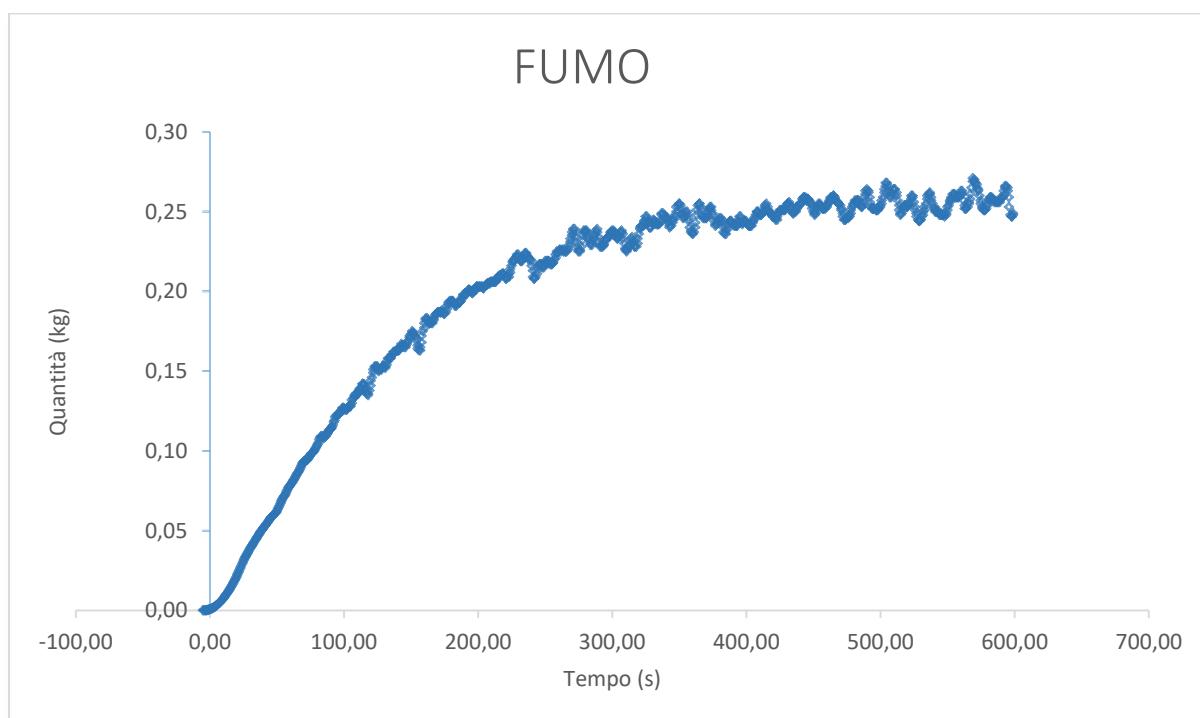


Figura 25. Curva della quantità di particolato di fumo prodotto in funzione del tempo.

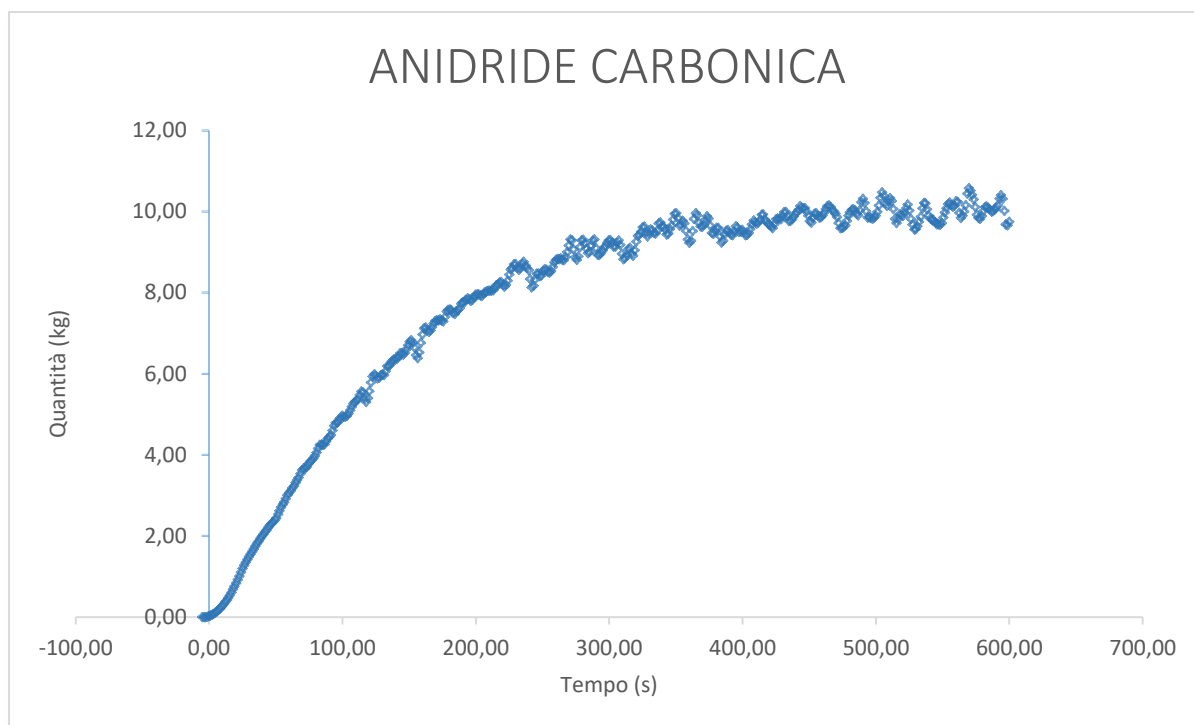


Figura 26. Curva della quantità di CO<sub>2</sub> prodotta in funzione del tempo.

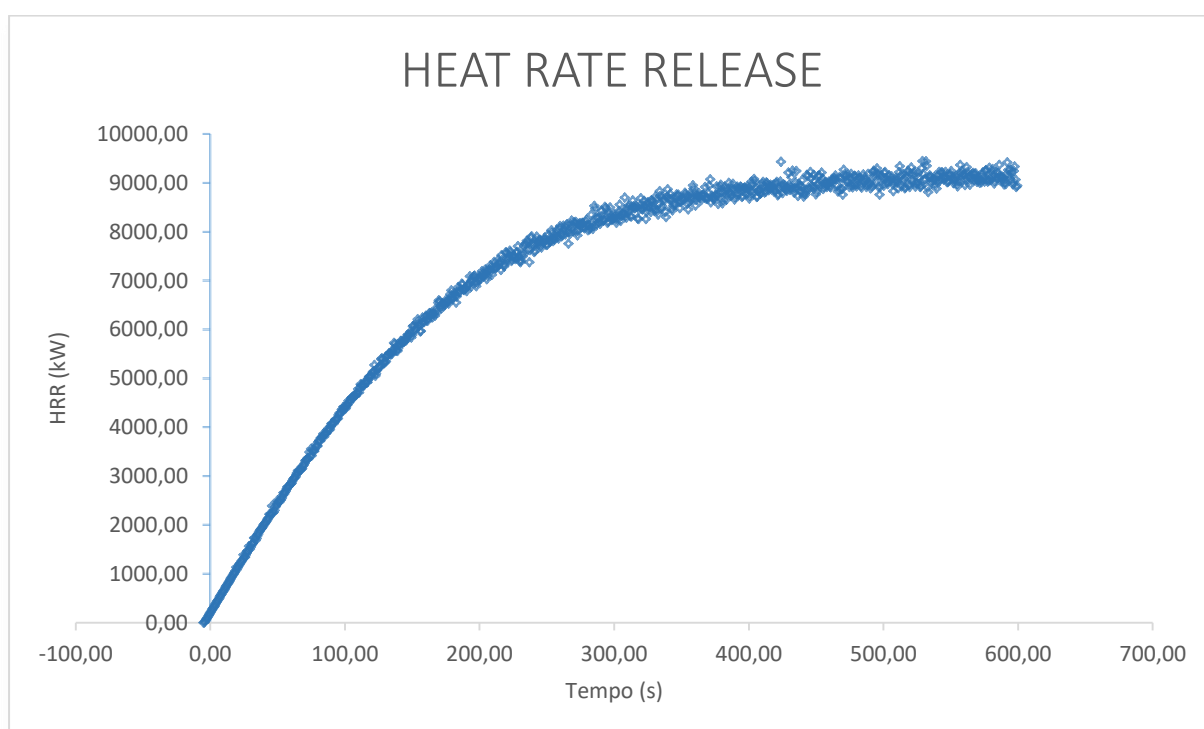


Figura 27. Curva di HRR(t) caratteristica dell'incendio.

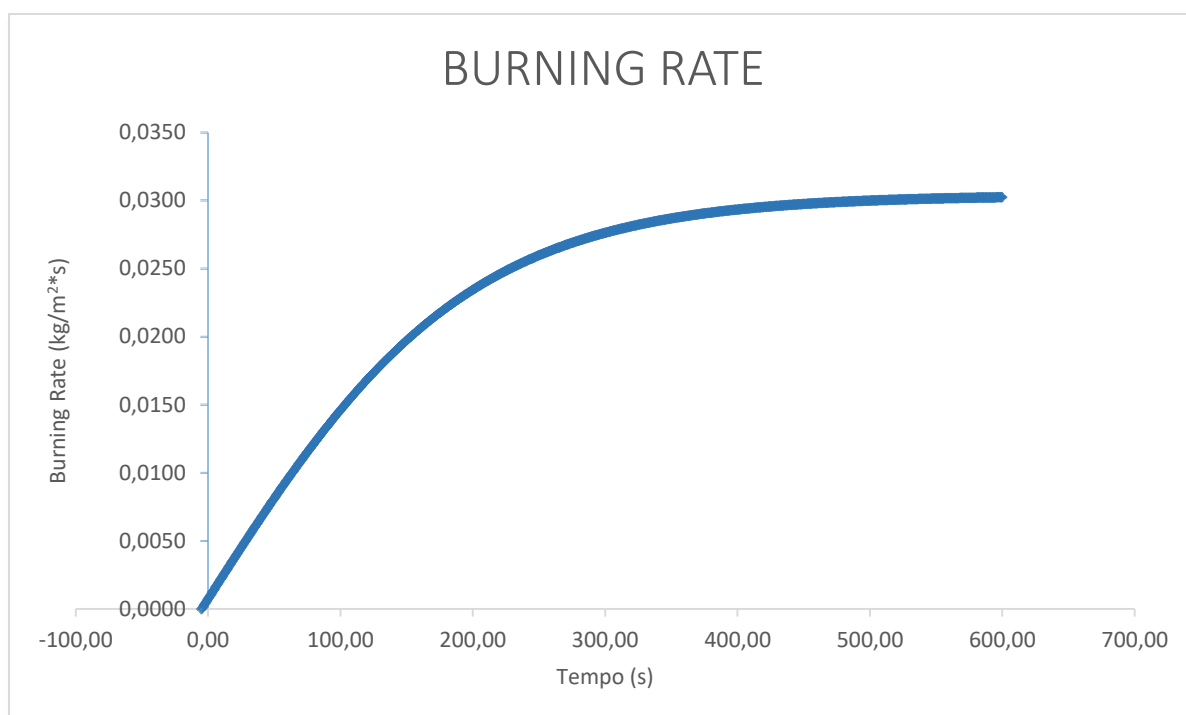


Figura 28. Curva della velocità della reazione di combustione.

Nella Tabella 14 sono riportati i risultati della simulazione del terzo scenario. Si riportano rispettivamente i valori della media integrata nel tempo<sup>1</sup>, la media aritmetica ed il picco massimo registrato durante la simulazione per ogni prodotto della combustione considerato.

Tabella 14. Valori delle rese verso *soot*, CO<sub>2</sub> e CO, HRR e Burning Rate, caratteristiche dello scenario considerato.

SCENARIO 3	CO	SOOT	CO <sub>2</sub>	HRR	BURNING RATE
	kg/s	kg/s	kg/s	kW/s	kg/m <sup>2</sup> /s
Media integrata nel tempo	0.111	0.199	7.76	7073.22	0.0234
Media aritmetica	0.111	0.199	7.77	7073.87	0.0234
Picco massimo	0.151	0.270	10.58	9448.04	0.0302

I file eseguiti sono visibili in appendice B.3.

## 5.5 Scenario 4: Incendio di tre pile di plastica omogenee.

Lasciate immutate le condizioni ambientali, l'ultima simulazione è stata svolta considerando:

- tre pile di materiale plastico compattato, composte rispettivamente da PE, PET e PP;
- durata dell'incendio pari a 20 minuti;
- la reazione di combustione, per semplicità di calcolo, si considera attivata da un combustibile;
- residui di combustione considerati mediati tra i 3 valori delle 3 materie plastiche.

### 5.5.1 Risultati

I prodotti della combustione si riportano nelle figure successive.

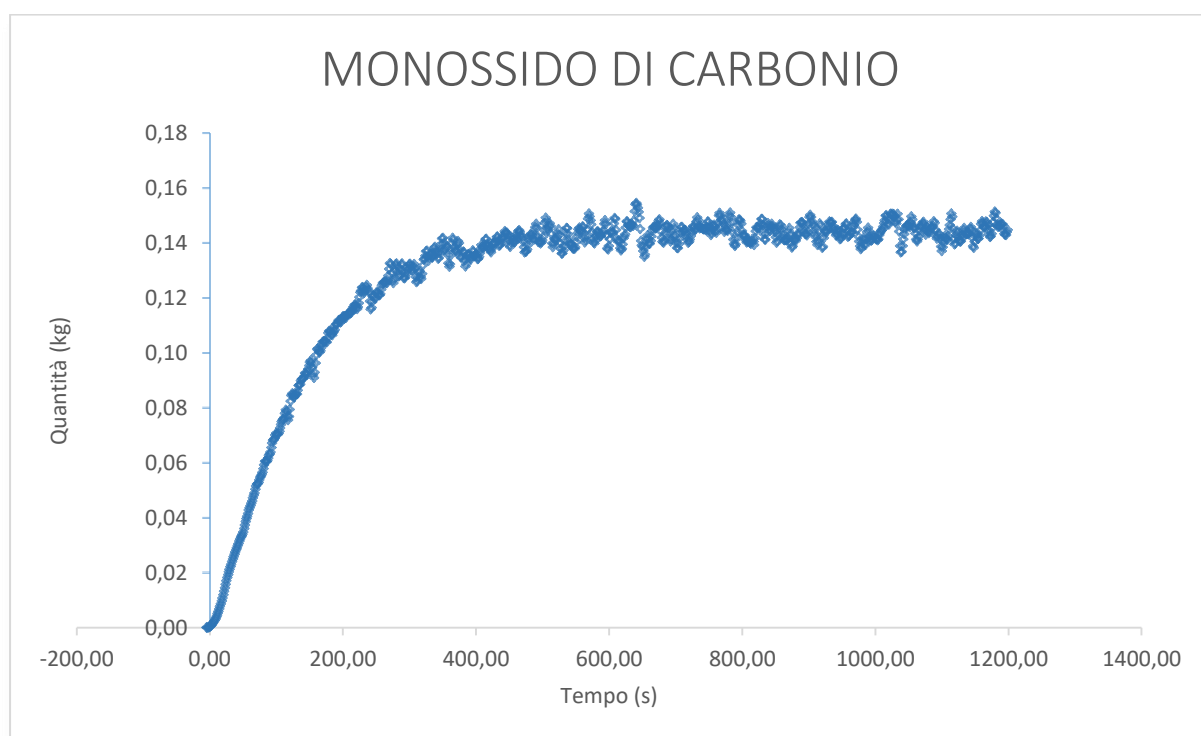


Figura 29. Curva della quantità di CO prodotta in funzione del tempo.

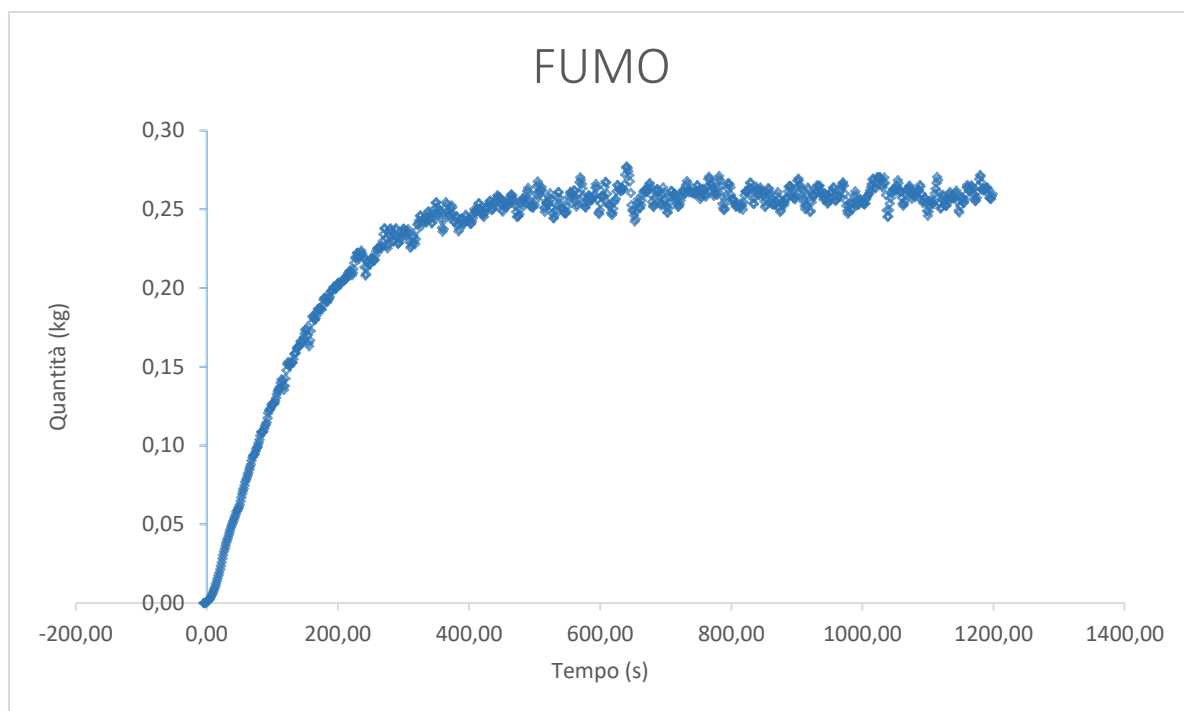


Figura 30. Curva della quantità di particolato di fumo prodotto in funzione del tempo.

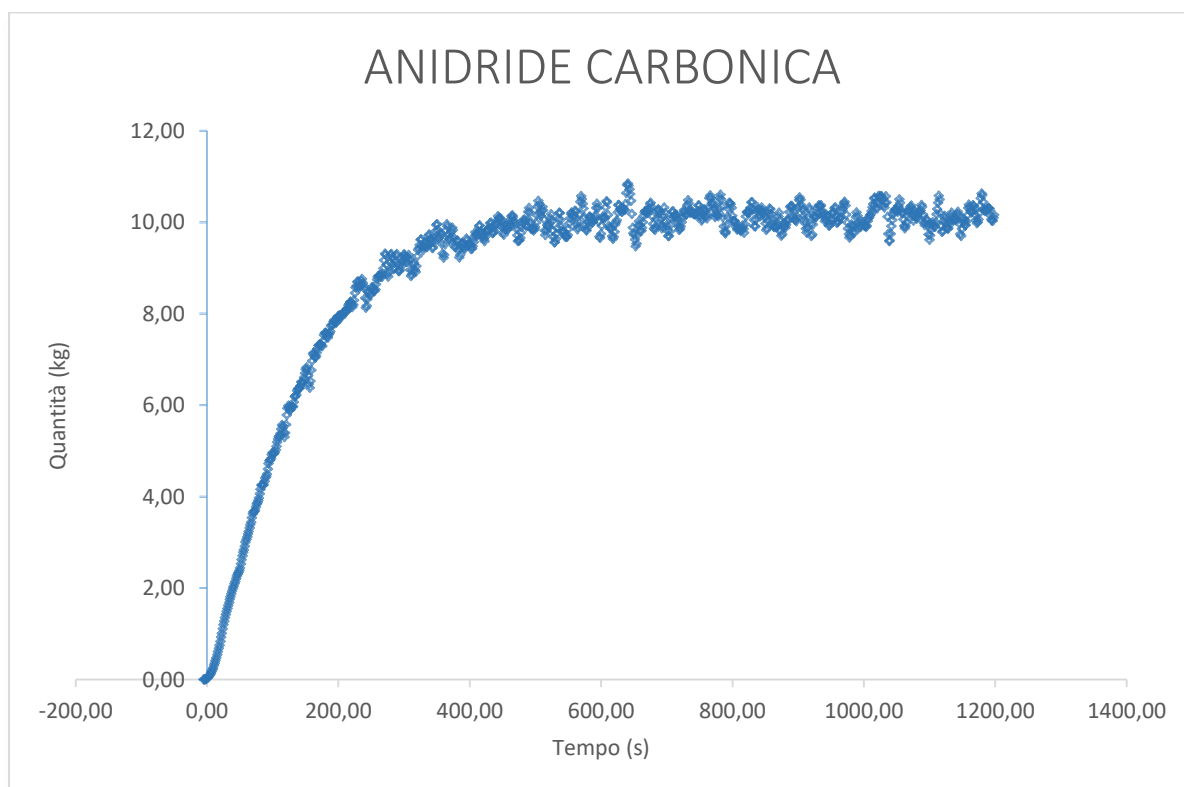


Figura 31. Curva della quantità di CO<sub>2</sub> prodotta in funzione del tempo.



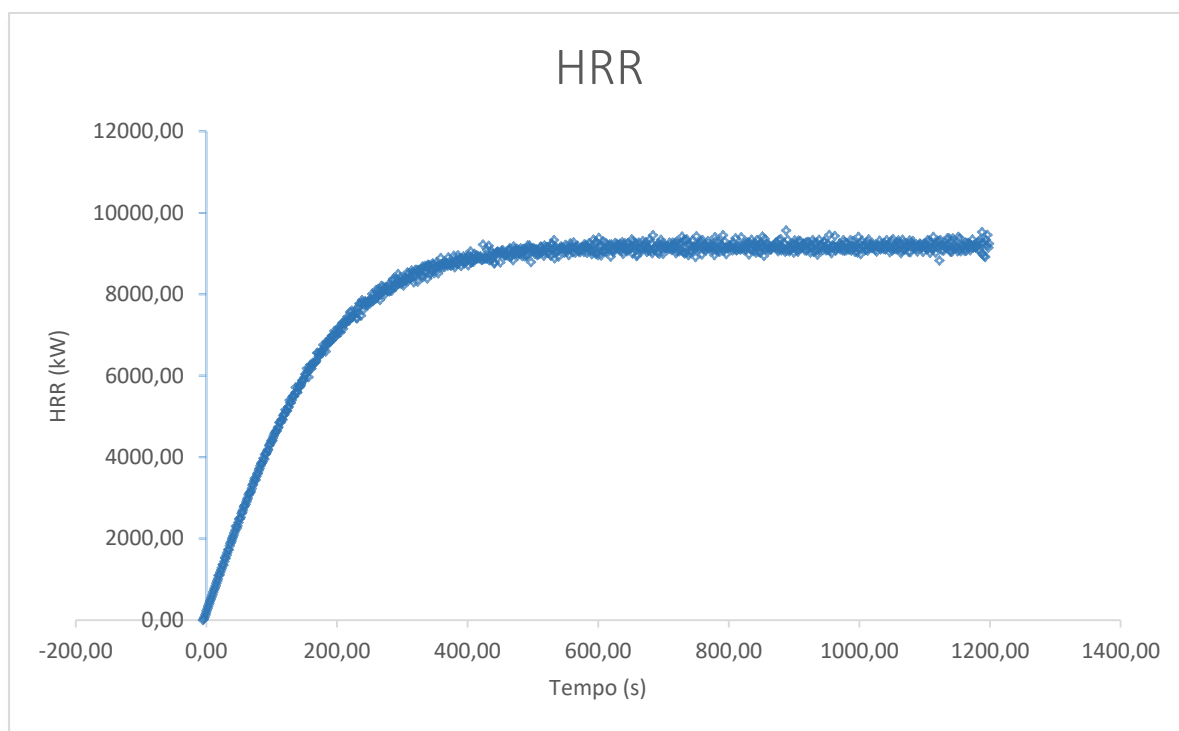


Figura 32. Curva di HRR(t) caratteristica dell'incendio.

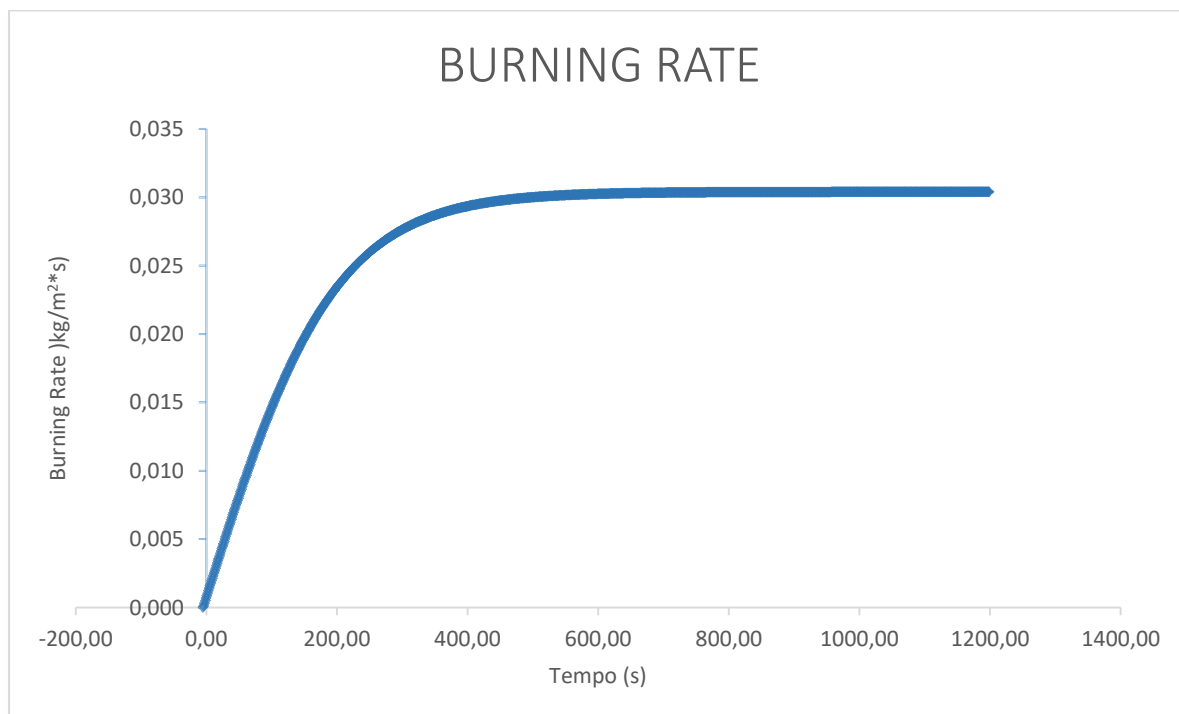


Figura 33. Curva della velocità della reazione di combustione.

Nella Tabella 15 sono riportati i risultati della simulazione del terzo scenario. Si riportano rispettivamente i valori della media integrata nel tempo<sup>1</sup>, la media aritmetica ed il picco massimo registrato durante la simulazione per ogni prodotto della combustione considerato.

Tabella 15. Valori delle rese verso *soot*, CO<sub>2</sub> e CO, HRR e Burning Rate, caratteristiche dello scenario considerato.

<b>SCENARIO 4</b>	<b>CO</b>	<b>SOOT</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>HRR</b>	<b>BURNING RATE</b>
	kg/s	kg/s	kg/s	kW/s	kg/m <sup>2</sup> /s
Media integrata nel tempo	0.127	0.228	8.94	8114.96	0.0269
Media aritmetica	0.127	0.228	8.94	8115.37	0.0269
Picco massimo	0.154	0.277	10.85	9567.43	0.0304

I file eseguiti sono visibili in appendice B.4.

1. La media integrale di una funzione su un intervallo è il rapporto tra l'integrale definito della funzione sull'intervallo e la lunghezza dell'intervallo. Si definisce media integrale della funzione  $f(x)$  sull'intervallo  $[a, b]$  il numero reale:

$$M(f, [a, b]) = \frac{1}{b - a} \int_a^b f(x) dx$$

## 5.6 Calore prodotto dalla combustione

Il software FDS è in grado di calcolare le proprietà termiche delle specie gas prodotte. Attraverso il *Namelist "SLCF"* (*Slice File Parameters*), è possibile tracciare in output dei piani di sezione ad una coordinata fissata per monitorare una determinata quantità. Nel caso in esame è stata tracciata un piano alla distanza di 10 metri dalla balla, lungo la direzione sottovento.

Il piano di sezionamento è stato scelto perpendicolare alla direzione del vento, passante per la coordinata  $x=60$ . Su di esso è stato registrato l'andamento della temperatura dell'aria ad ogni istante della simulazione.

Di seguito verranno riportati gli andamenti 2D per il piano analizzato, considerando l'istante finale della simulazione.

- Scenario 1 ( $t = 600s$ )

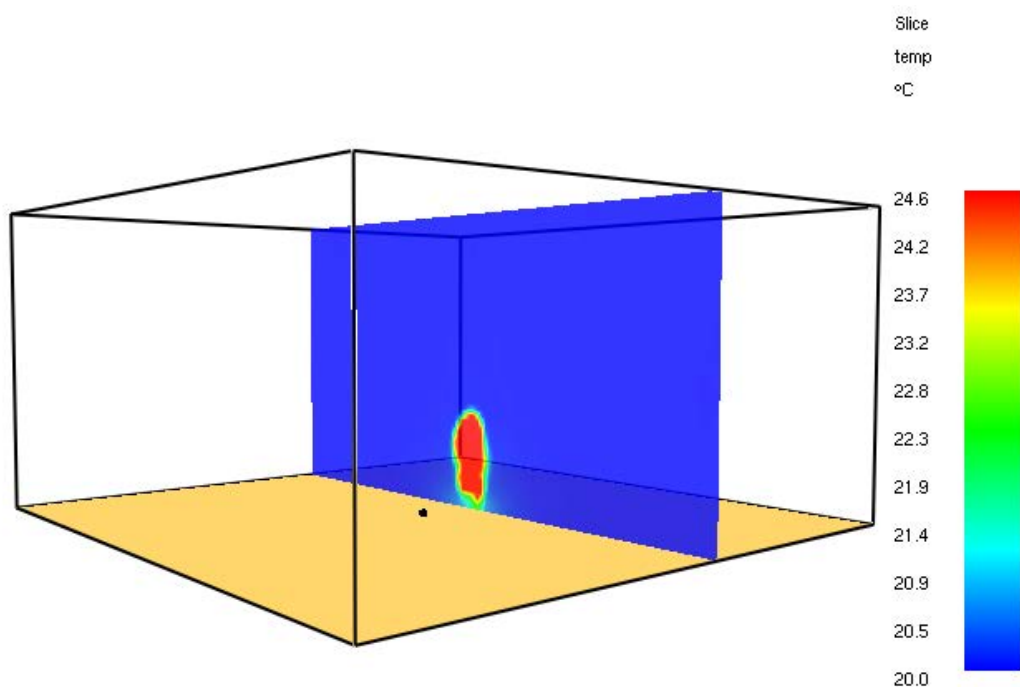


Figura 34. Andamento della temperatura per il piano  $x=60$ .

- Scenario 2 ( $t = 1200s$ )

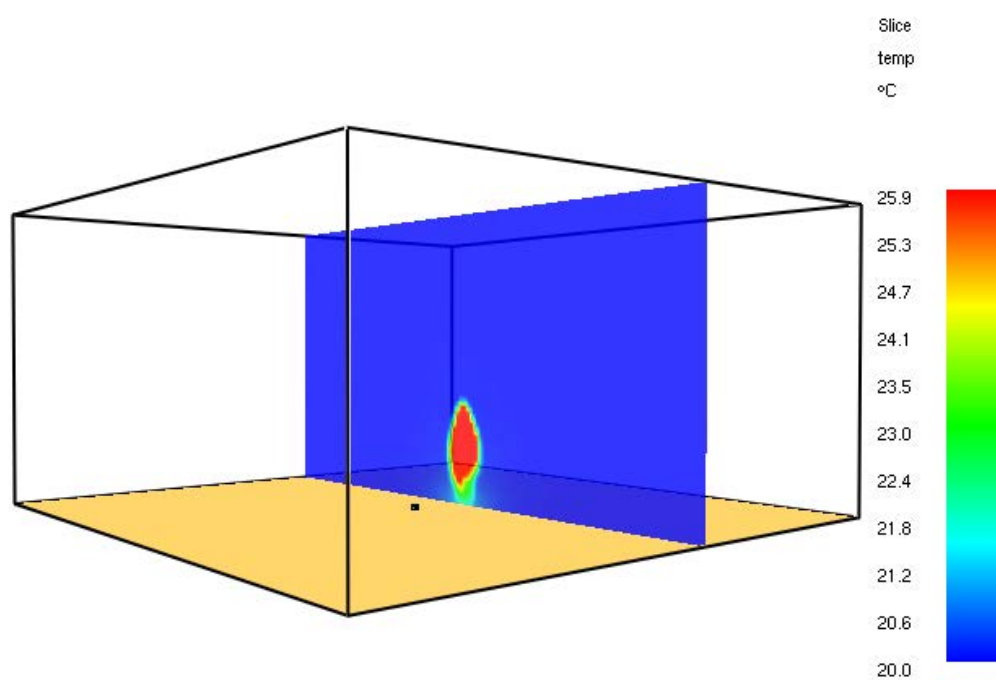


Figura 35. Andamento della temperatura per il piano  $x=60$ .

- Scenario 3 ( $t = 600s$ )

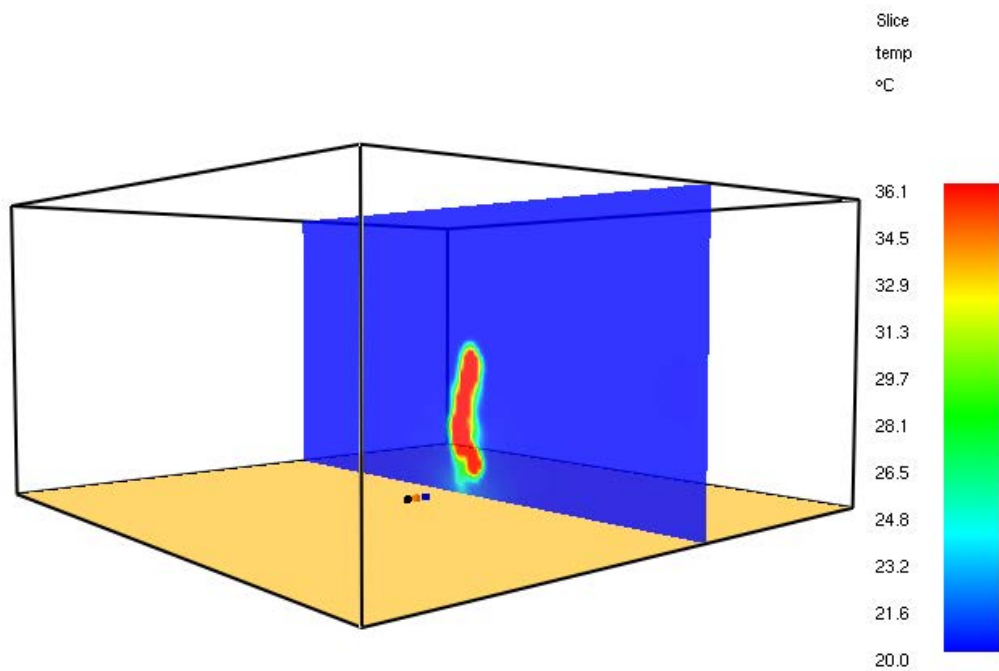


Figura 36. Andamento della temperatura per il piano  $x=60$ .

- Scenario 4 ( $t = 1200s$ )

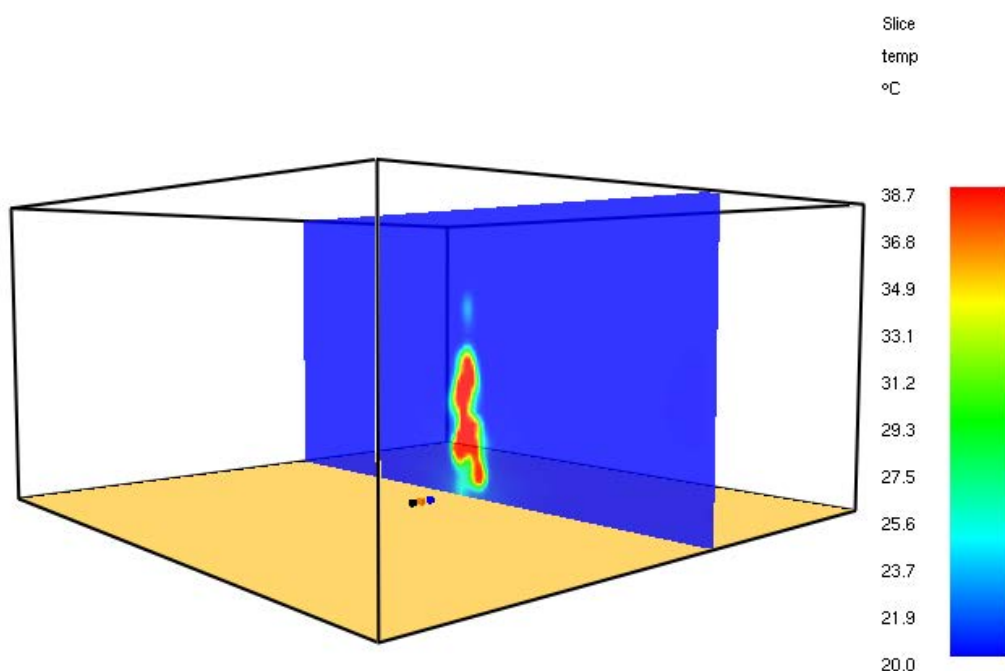


Figura 37. Andamento della temperatura per il piano  $x=60$ .

Nello Scenario 1 il picco di temperatura raggiunto è di  $24,6^{\circ}C$ ; aumentando la durata dell'incendio, come nello Scenario 2, si avrà invece un picco di temperatura di  $25,9^{\circ}C$ . La temperatura iniziale è di  $20^{\circ}C$ , quindi si avrà un incremento di temperatura nell'ordine di pochi gradi alla distanza di 10 metri dalla fiamma, lungo la distanza sottovento. Nei pressi del terreno, la temperatura entra nella "zona verde", si raggiungono dunque temperature nell'ordine di  $22^{\circ}-23^{\circ}C$ .

Negli Scenari 3 il picco di temperatura raggiunge i  $36,1^{\circ}C$ , mentre nello Scenario 4, alla stessa distanza il picco di temperatura arriva a  $38,7^{\circ}C$ . Anche al livello del terreno gli incrementi di temperatura sono considerevoli, con valori di temperatura che si aggirano intorno ai  $29^{\circ}-31^{\circ}C$ .

Per meglio indagare il fenomeno, si è anche effettuata un'indagine sull'irraggiamento prodotto dalle balle durante l'incendio.

Nello Scenario 1, entro i primi 4 metri dal fuoco, il calore irraggiato è pari a  $0,19 \text{ kW/m}^2$ ; nello stesso spazio, nello Scenario 2, i valori si attestano invece su  $0,24 \text{ kW/m}^2$ .

Le tre balle a fuoco dello Scenario 3, nei primi 2 metri di distanza dal fuoco nella direzione sottovento, fanno registrare valori di  $1,57 \text{ kW/m}^2$ , mentre nell'ultima simulazione, tale valore può raggiungere anche il valore di  $1,79 \text{ kW/m}^2$ .

# Capitolo 6

## Software ALOFT-PC

Nel capitolo seguente è presente un accenno ai principi di funzionamento del software ALOFT-PC, utilizzato per lo studio delle traiettorie dei fumi e per lo studio delle ricadute degli effluenti tossici derivanti dagli incendi di materie plastiche.

### 6.1 ALOFT-FT

Il software Aloft-PC, acronimo di “*A Smoke Plume Trajectory Model for Personal Computers*”, è un programma prodotto e sviluppato dal NIST (*National Institute of Standard and Technology*), la cui funzione è quella di modellare la traiettoria del pennacchio dei fumi derivanti da un incendio.

Con il software si ha la possibilità di studiare la concentrazione dei prodotti della combustione al livello del suolo o del mare, ad una certa distanza prestabilita, nelle aree sottovento.

Aloft si basa sul modello sviluppato dal NIST che descrive la traiettoria del pennacchio mediante una forma semplificata dell'equazione di Navier-Stokes.

#### 6.1.1 Il modello matematico

La velocità del pennacchio nella direzione del vento è assunta pari alla velocità del vento stesso. Una volta fatta tale approssimazione, è possibile rappresentare il pennacchio con una figura bidimensionale nella direzione del vento, in relazione al tempo.

Il pennacchio non è altro che un continuo flusso di particolato e gas, trasportato verso l'alto dal calore dei gas stessi e dal vento, derivante da un incendio. All'interno del software può dunque essere descritto come un trasporto convettivo in regime stazionario. Il modello, non descrive il comportamento del fuoco, ma soltanto il comportamento nel tempo del pennacchio di fumo rilasciato durante l'incendio. La simulazione viene effettuata nella direzione sottovento, ad una certa distanza dall'incendio, cosicché il flusso convettivo risenta

esclusivamente di piccole variazioni di temperatura, l'effetto radiante sia ridotto al minimo e la velocità del vento non ne risenta.

La traiettoria del pennacchio è influenzata dal vento, dalla stratificazione dell'atmosfera e dalla temperatura che varia in funzione dell'altezza, secondo un profilo predefinito.

Fatte queste assunzioni, il modello matematico svolge il calcolo basandosi sulle equazioni di conservazione della massa, del momento e dell'energia che governano la temperatura, la pressione, la densità e la velocità trasversale del vento.

La velocità del vento nell'ambiente viene considerata costante e maggiore rispetto alla velocità trasversale del vento.

Un'altra semplificazione introdotta dal modello è quella di considerare l'altezza del pennacchio, in termini di temperatura teorica dell'atmosfera, indisturbata. In questo modo è possibile considerare le equazioni del moto come un sistema bidimensionale tempo-dipendente, piuttosto che tridimensionale.

Inizialmente la velocità perpendicolare del pennacchio è assunta pari a zero, così come i valori di pressione e temperatura di perturbazione e della componente iniziale di turbolenza. Gli effetti della turbolenza atmosferica si possono modellare secondo due differenti meccanismi:

- 1) considerare nella piccola scala di mescolamento una viscosità turbolenta costante settata ad un valore di tre ordini di grandezza maggiore rispetto a quello della viscosità dell'aria.
- 2) considerare un raggio di risoluzione che varia dai cinque ai quindici metri, distanza necessaria per definire un incendio di larga scala inducendo moti turbolenti considerevoli.

### ***6.1.2 Il modello numerico***

L'assunzione del vento uniforme, con il conseguente ridimensionamento delle equazioni, hanno trasformato il problema da tridimensionale a regime stazionario, ad uno bidimensionale dipendente dal tempo, che può essere risolto mediante la tecnica delle differenze finite. Il dominio computazionale che attraversa il piano del vento trasversale si estende di una unità nella direzione verticale, di quattro unità nella direzione orizzontale ed è diviso in celle rettangolari che occupano tutta l'estensione del piano sottovento. La



grandezza delle celle è calcolata dal modello in modo che il pennacchio si adatti allo spazio computazionale. La velocità orizzontale è assegnata sul bordo destro e sinistro di ciascuna cella, mentre la velocità verticale è assegnata sui bordi inferiori e superiori della cella. Al contrario, la temperatura e la pressione sono prese al centro di ogni cella.

Tale schema di posizionamento delle variabili di flusso porta ad uno schema di differenziazione naturale ed efficiente per le equazioni, la cui soluzione avanza nel tempo secondo lo schema di Runge-Kutta del secondo ordine.

Il modello regola inoltre automaticamente gli steps temporali, per assicurarne la stabilità.

### ***6.1.3 Intrappolamento delle particelle***

Un numero fisso di particelle sono utilizzate per rappresentare il particolato trasportato sottovento dal pennacchio. Tali particelle vengono introdotte nel flusso all'inizio del calcolo e mosse per convezione dal flusso indotto.

La distribuzione iniziale delle particelle, così come la distribuzione della temperatura, è uniforme all'interno di un'area ellittica nel piano del vento trasversale. Tutte le particelle si muovono nella direzione sottovento e con la stessa velocità del vento.

La media della velocità all'inizio e alla fine di una fase temporale viene utilizzata per definire la posizione progressiva delle particelle, mentre le particelle che raggiungono le celle a livello del suolo sono considerate depositate sul terreno e di conseguenza non più considerate nel calcolo.

### ***6.1.4 Il software***

Aloft-PC include una routine di input / output interattiva che:

- 1) consente all'utente di selezionare le unità input;
- 2) esegue controlli di errore e di intervallo sui dati;
- 3) fornisce metodi per stimare i valori di input in base alle condizioni osservate;
- 4) consente una comoda selezione dei file di input e output;
- 5) fornisce spiegazioni per gli input;
- 6) fornisce una semplice visualizzazione grafica dei risultati.

Oltre agli output grafici restituiti dal programma, Aloft è in grado di generare una serie di file di output, nei quali sono riportati i profili di concentrazione del particolato e le informazioni sulla griglia computazionale.

### 6.1.5 Input di Aloft

I parametri relativi alla dimensione della griglia sono settati sui valori ottimali e all'utente non viene data la possibilità di modificarli.

Si riportano di seguito gli input richiesti per costruire il modello ed una breve descrizione:

**Titolo:** si utilizza per identificare il set di dati per l'utente. La lunghezza massima è di 80 caratteri.

**Velocità del vento:** il modello presume che la velocità del vento sia costante con l'altezza e la distanza sottovento. Le unità per la velocità del vento sono m/s, sono ammessi valori di velocità del vento compresi tra 2 e 15 m/s.

**Deviazione standard della velocità del vento orizzontale e verticale:** rappresentano le deviazioni del vento mediate nel tempo dalla direzione prevalente, in gradi. La Tabella 16 riporta le relazioni tra la categoria di stabilità di Pasquill-Gifford e la deviazione standard della direzione del vento (Randerson, 1984). La Tabella 17 fornisce la relazione tra le condizioni meteorologiche osservate e la categoria di stabilità di Pasquill-Gifford. (Randerson 1984, Slade 1968).

Tabella 16. Classi di stabilità di Aloft.

Velocità del vento superficiale	Irraggiamento giornaliero			Condizioni notturne	
	Forte	Moderata	Leggera	Nielo coperto o nuvolosità $\leq 1/8$	Nuvolosità $\leq 3/8$
m/s					
2	A-B	B	C	E	F
4	B-C	B-C	C	D	E
6	C-D	C-D	D	D	D
>6	D	D	D	D	D

Tabella 17. Relazioni tra classi di stabilità e deviazioni standard della velocità del vento.

Categoria di stabilità di Pasquill-Gilford.	Deviazione standard della velocità del vento orizzontale. (C°)	Deviazione standard della velocità del vento verticale. (C°)
A: Estremamente instabile	25	16
B: Moderatamente instabile	20	12
C: Leggermente instabile	15	10
D: Neutra	10	6
E: Leggermente stabile	5	3
F: Moderatamente stabile	2.5	2

**Distanza sottovento:** è la distanza dal fuoco nella direzione sottovento è espressa in chilometri e può assumere valori compresa tra 0,5 e 20 km. Sebbene i risultati siano ottenibili anche per distanze inferiori a 1 km, le previsioni potrebbero non essere valide in quanto, i dettagli del fuoco non sono modellati.

**Heat rate release:** è la velocità di rilascio del calore convettivo del fuoco, espressa in MW. Il calore radiativo non è considerato dal modello. presume che circa il 10% della velocità di rilascio del calore totale venga persa per irraggiamento, quindi la velocità di rilascio del calore convettivo è considerata pari al 90% del HRR. L'HRR per unità di area è in funzione della dimensione del fuoco e del tipo di combustibile che viene bruciato. La velocità di rilascio del calore dovrebbe essere compresa tra 50 e 2000 MW.

**Tasso di rilascio di massa del particolato del fumo di fuoco:** è la massa di particolato generato dall'incendio in kg/s. Si tratta di dati che vengono normalmente calcolati sperimentalmente. Il modello può calcolare la concentrazione sottovento di qualsiasi prodotto di combustione non reagente, in base all'impostazione input data dall'utente.

**Area del fuoco:** è l'area di combustione del combustibile, espressa in m<sup>2</sup>. L'area del fuoco non viene utilizzata direttamente nel modello, tuttavia può essere utilizzata in combinazione di input alternativi specificati dall'utente. Al fine di evitare conflitti tra le parti con la routine di input, è necessario specificare sempre un'area di fuoco. I valori accettati dal programma sono compresi tra 25 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>.



# Capitolo 7

## Modellazione degli scenari di Aloft-PC

Nel presente capitolo ci si concentrerà sullo studio della dispersione degli effluenti tossici derivanti dall'incendio. Verranno dapprima descritti gli scenari che saranno analizzati con il software Aloft-Pc; seguirà un report dei risultati ottenuti per ogni scenario.

### 7.1 Analisi della dispersione degli effluenti

Lo studio della dispersione degli effluenti tossici dell'incendio verrà realizzato utilizzando i dati ricavati dalle simulazioni di incendi di balle di plastica compattata realizzati nei §5.2, §5.3, §5.4 e §5.5. In particolare, per ogni caso esposto, si andranno a studiare la dispersione nello spazio delle emissioni di:

- PM10;
- CO<sub>2</sub>;
- CO.

L'andamento delle concentrazioni delle suddette specie, verrà studiato fino alla distanza di 5 km dal focolare.

Lo studio di ogni scenario, partendo dai risultati riportati nei grafici del §5, verrà condotto in due differenti modi:

- 1) nel primo caso si considereranno i valori di picco massimo ricavati in ogni scenario, così da poter simulare la dispersione nelle condizioni peggiori;
- 2) nel secondo caso verranno invece presi in considerazione i valori della media integrata nel tempo delle grandezze ricavate per ogni scenario.

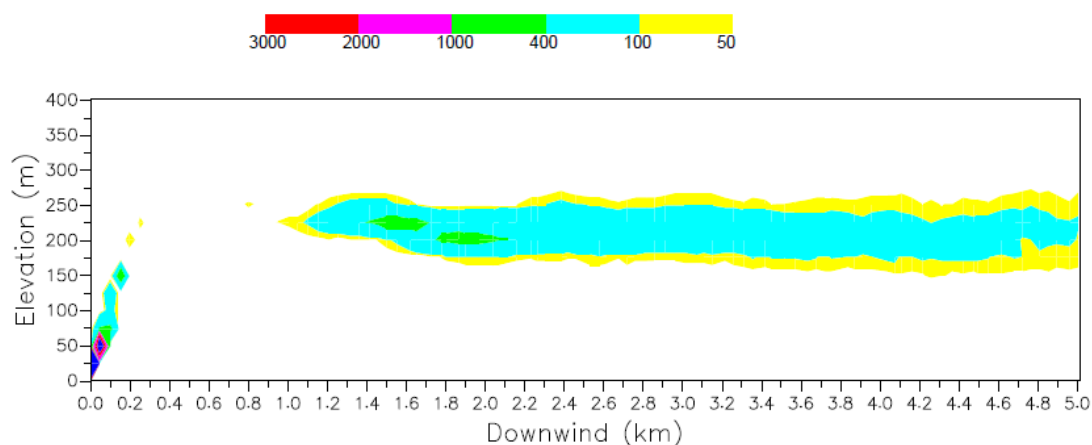
## 7.2 Dispersione effluenti dello Scenario 1

Nella Tabella 18 sono riportati i parametri che variano utilizzati per realizzare le simulazioni.

Tabella 18. Input dello scenario considerato.

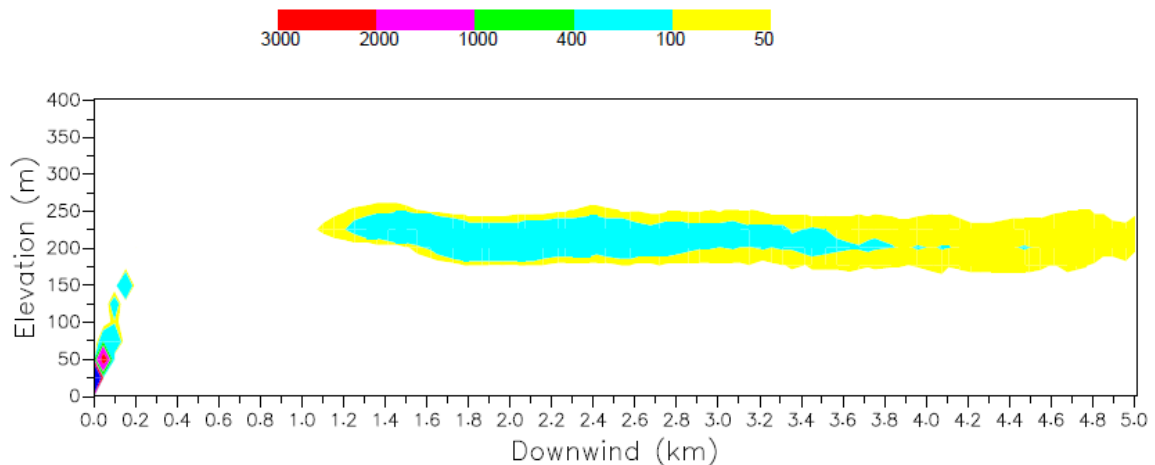
SCENARIO 1	Valori di picco	Valori mediati
Distanza sottovento (km)	5	5
Superficie dei fuochi (m <sup>2</sup> )	25	25
HRR (MW/m <sup>2</sup> )	1.994	1.45
Radiative factor	0.38	0.38
Burning rate per unit area (kg/m <sup>2</sup> *s)	0.01	0.0077
PM10 (g/kg)	99	74
CO <sub>2</sub> (g/kg)	3877	2844
CO (g/kg)	55	41
Vento (m/s)	2.5	2.5
Temperatura superficiale (°C)	20	20
Classe di stabilità	D	D

### Valori di picco



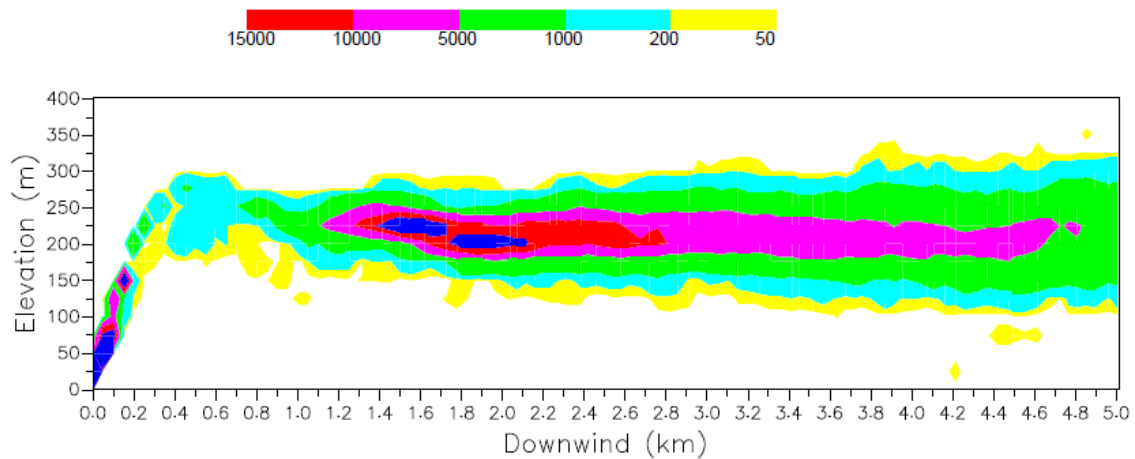
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 38. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 39. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 40. Concentrazione dell'anidride carbonica.

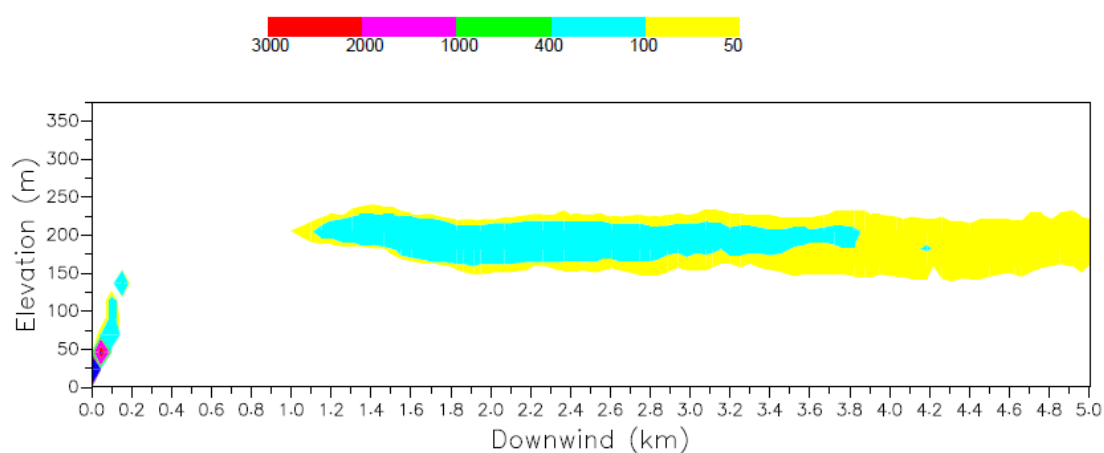
Nel primo scenario analizzato si può immediatamente vedere che l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 50 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intorno ai 200-230 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) supera i valori di  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per tutto il profilo verticale della nube, con alcuni picchi di  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ad una distanza di 1,5 km dall'incendio.

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un picco iniziale superiore ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 3,5 km dal focolare.

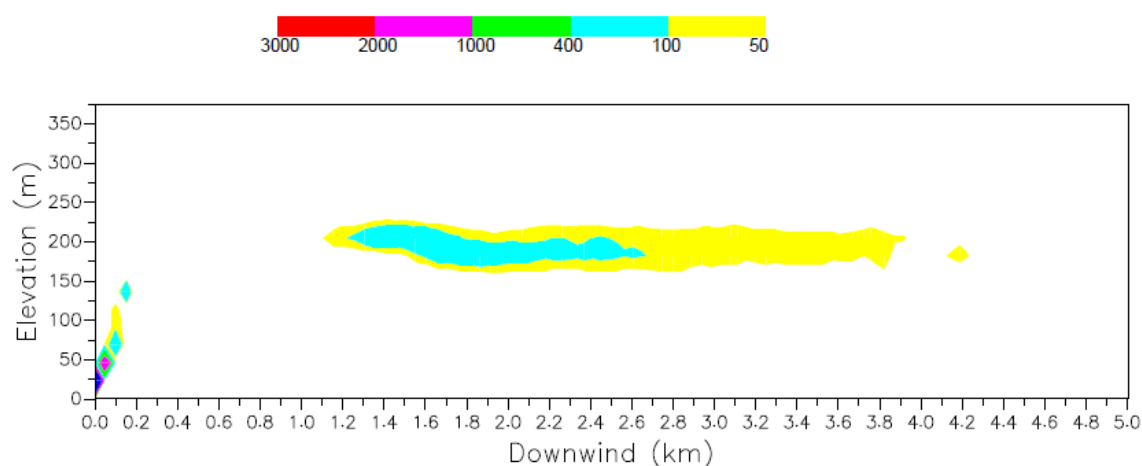
La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con un picco iniziale di concentrazione oltre i  $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresenta nella zona compresa tra 1,4 e 2 km, per poi abbassarsi sotto i  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 2,8 km di distanza dal fuoco.

## Valori mediati



Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 41. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 42. Concentrazione del monossido di carbonio.



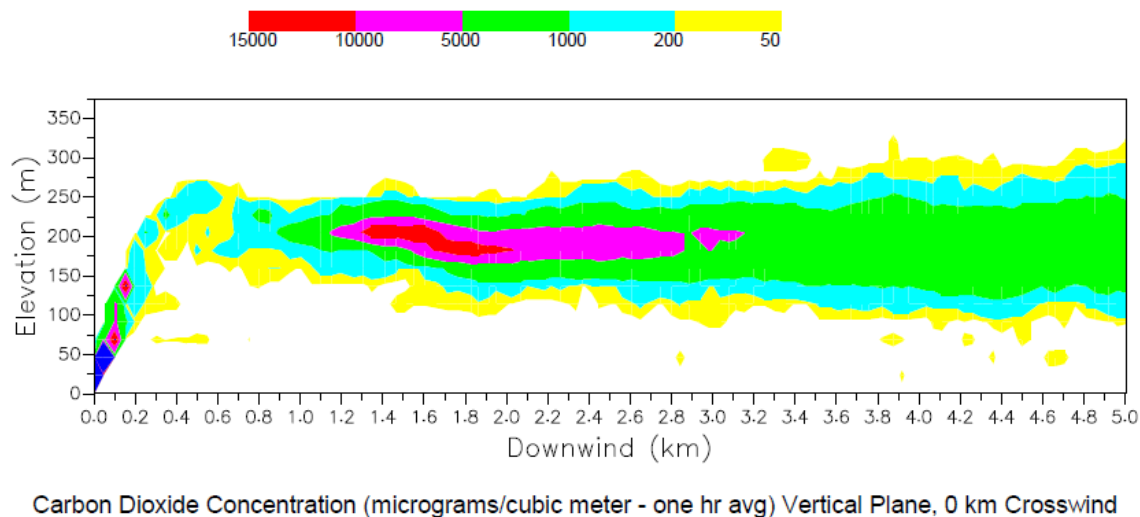


Figura 43. Concentrazione dell'anidride carbonica.

Nello scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 40 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) supera i valori di  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , fino a circa 3,8 km dall'incendio, dove la concentrazione si abbassa sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un breve picco iniziale superiore ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 2,5 km dal focolare, per poi azzerarsi totalmente entro i 4 km di distanza.

La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con picchi di concentrazione tra  $5000\text{-}10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresentano nella zona compresa tra 1,4 e 2 km, per poi abbassarsi sotto i  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 3 km di distanza dal focolare.

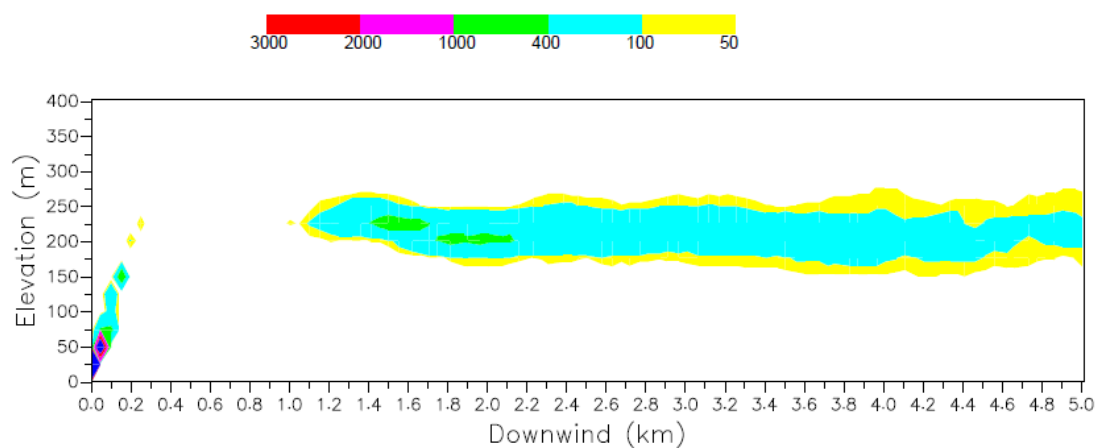
## 7.3 Dispersione effluenti dello Scenario 2

Nella Tabella 19 sono riportati i parametri che variano utilizzati per realizzare le simulazioni.

Tabella 19. Input dello scenario considerato.

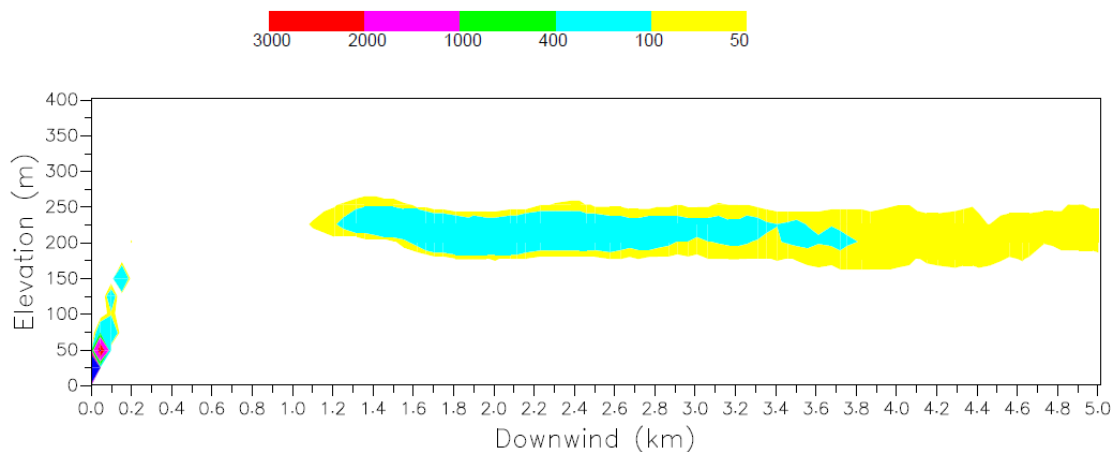
SCENARIO 2	Valori di picco	Valori mediati
Distanza sottovento (km)	5	5
Superficie dei fuochi (m <sup>2</sup> )	25	25
HRR (MW/m <sup>2</sup> )	1.96	1.67
Radiative factor	0.38	0.38
Burning rate per unit area (kg/m <sup>2</sup> *s)	0.01	0.0089
PM10 (g/kg)	101	85
CO <sub>2</sub> (g/kg)	3987	3344
CO (g/kg)	57	48
Vento (m/s)	2.5	2.5
Temperatura superficiale (°C)	20	20
Classe di stabilità	D	D

### Valori di picco



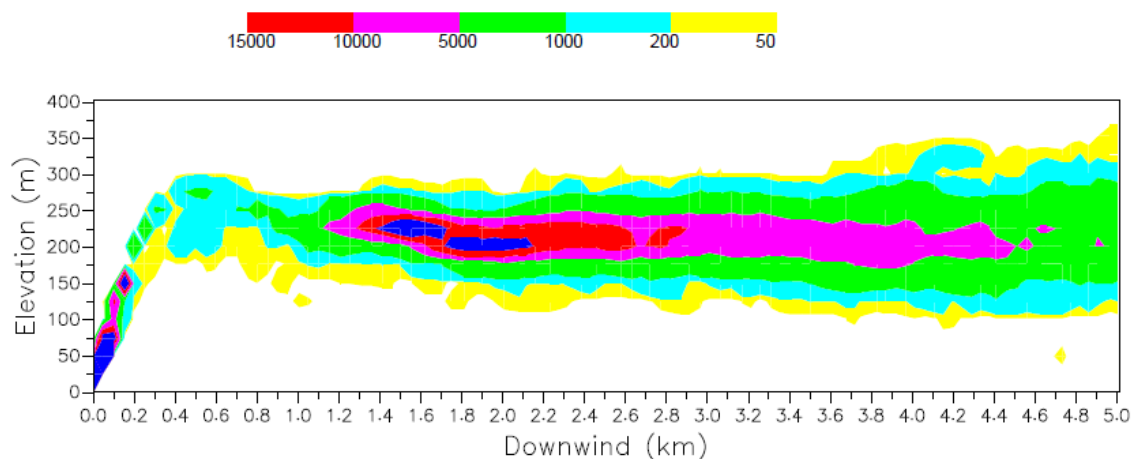
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 44. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 45. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 50. Concentrazione dell'anidride carbonica.

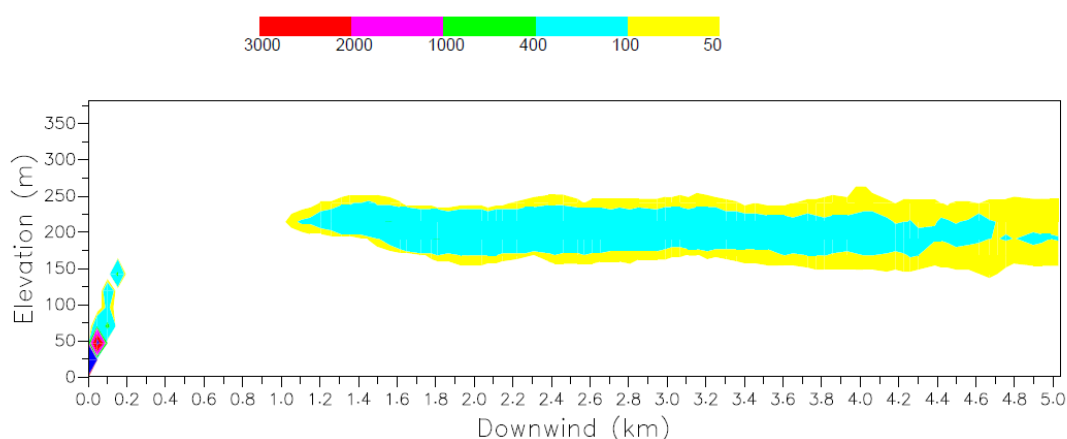
Nel secondo scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 50 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200-250 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) supera i valori di  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per tutto il profilo verticale della nube, con alcuni picchi di  $500\text{-}600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nell'intervallo compreso tra 1,4 e 2 km dall'incendio. Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un picco iniziale

superiore ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa  $3,8 \text{ km}$  dal focolare.

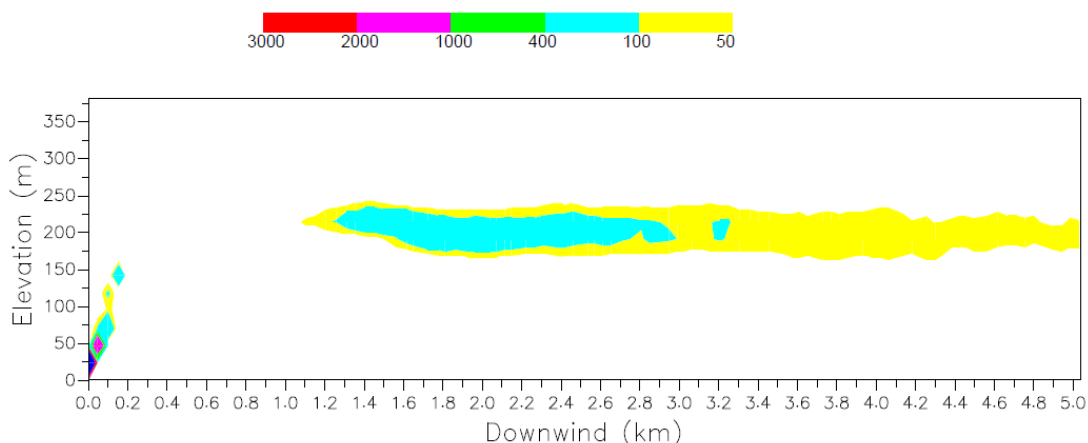
La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con un picco iniziale di concentrazione oltre i  $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresenta nella zona compresa tra  $1,4$  e  $2 \text{ km}$ , per poi abbassarsi sotto i  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa  $2,8 \text{ km}$  di distanza dal fuoco.

## Valori mediati



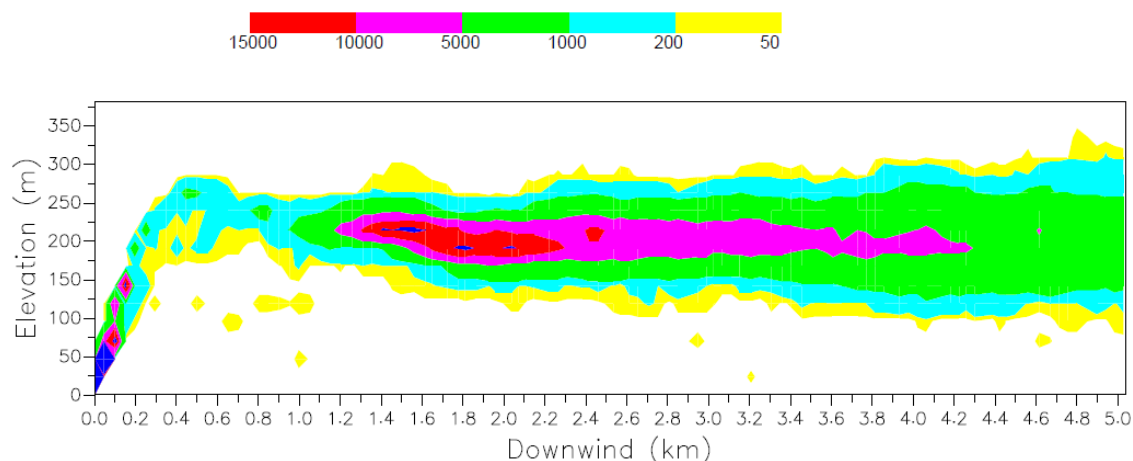
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 46. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 47. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 48. Concentrazione dell'anidride carbonica.

Nello scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 40 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200-230 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) si aggira attorno ai valori di 2000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , fino a circa 4,5 km dall'incendio, dove la concentrazione si abbassa sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un breve picco iniziale superiore ai 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 2,8 km dal focolare.

La concentrazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) segue lo stesso andamento, con picchi di concentrazione tra 5000-10000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresentano nella zona compresa tra 1,4 e 2,2 km fino a 15000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 4,2 km di distanza dal focolare.

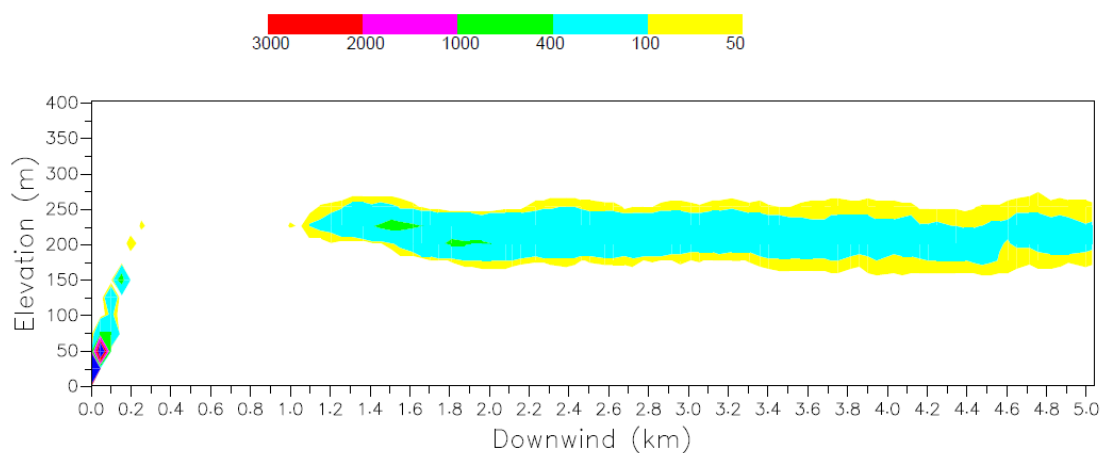
## 7.4 Dispersione effluenti dello Scenario 3

Nella Tabella 20 sono riportati i parametri che variano utilizzati per realizzare le simulazioni.

Tabella 20. Input dello scenario considerato.

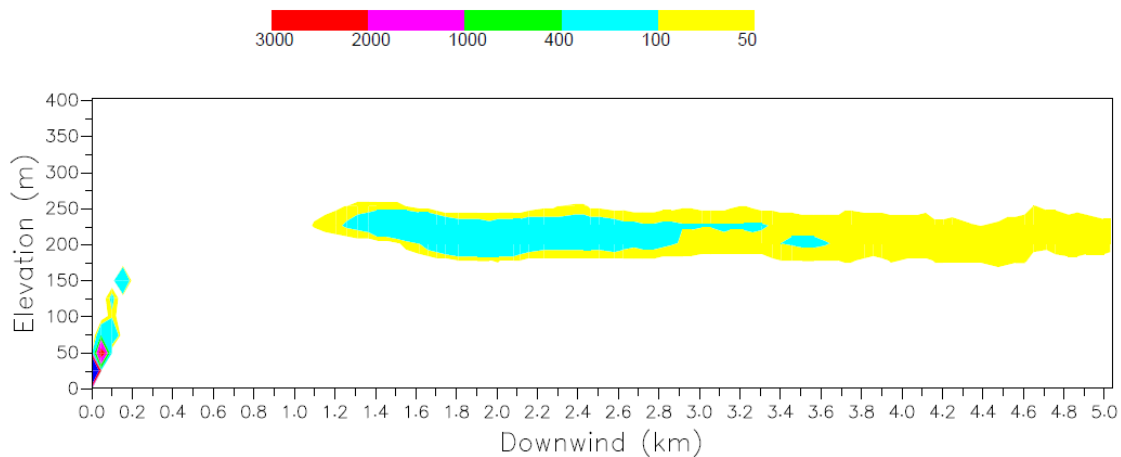
SCENARIO 3	Valori di picco	Valori mediati
Distanza sottovento (km)	5	5
Superficie dei fuochi (m <sup>2</sup> )	25	25
HRR (MW/m <sup>2</sup> )	1.97	1.47
Radiative factor	0.38	0.38
Burning rate per unit area (kg/m <sup>2</sup> *s)	0.010	0.078
PM10 (g/kg)	90	66
CO <sub>2</sub> (g/kg)	3527	2588
CO (g/kg)	50	37
Vento (m/s)	2.5	2.5
Temperatura superficiale (°C)	20	20
Classe di stabilità	D	D

### Valori di picco



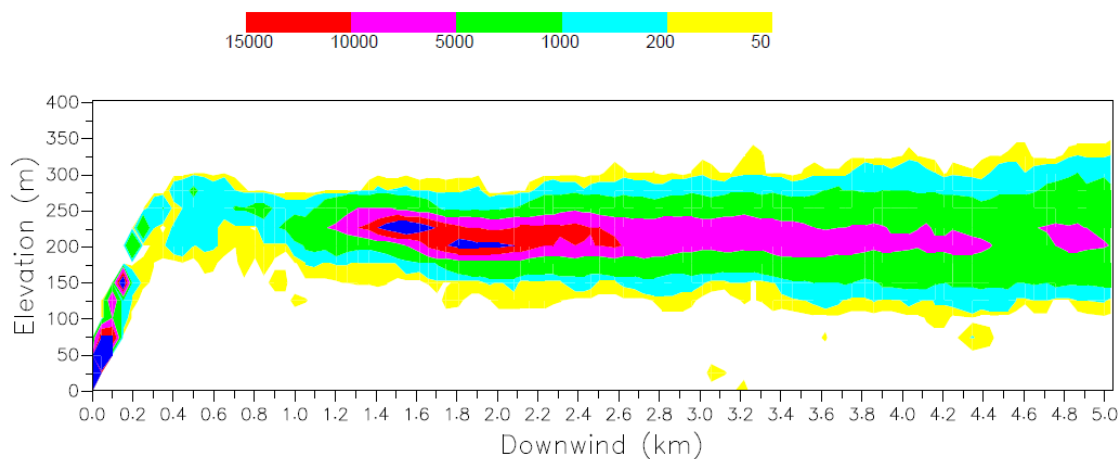
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 49. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 50. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 51. Concentrazione dell'anidride carbonica.

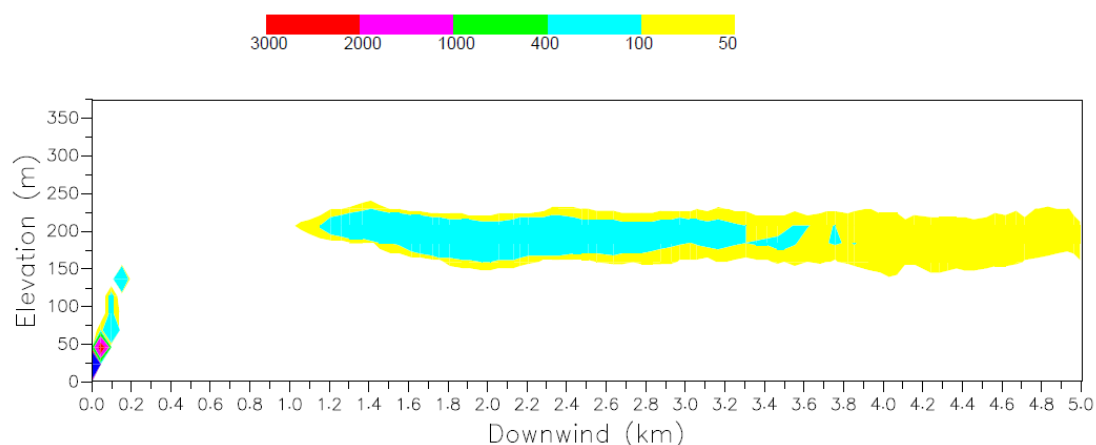
Nel terzo scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 50 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200-250 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) si attesta intorno ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per tutto il profilo verticale della nube.

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un picco iniziale superiore ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 2,8 km dal focolare.

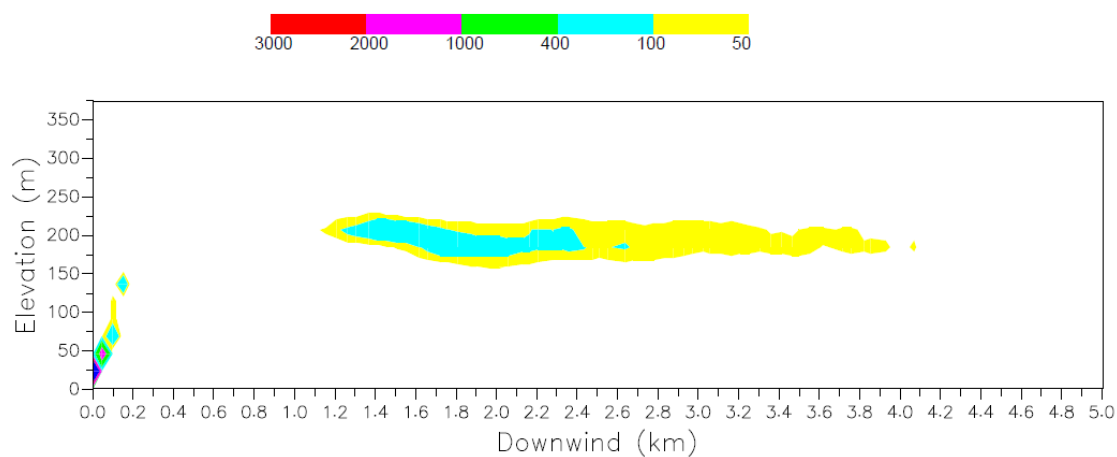
La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con un picco iniziale di concentrazione oltre i  $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresenta nella zona compresa tra 1,2 e 2,6 km, per poi abbassarsi sotto i  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 4,4 km di distanza dal fuoco.

## Valori mediati



Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

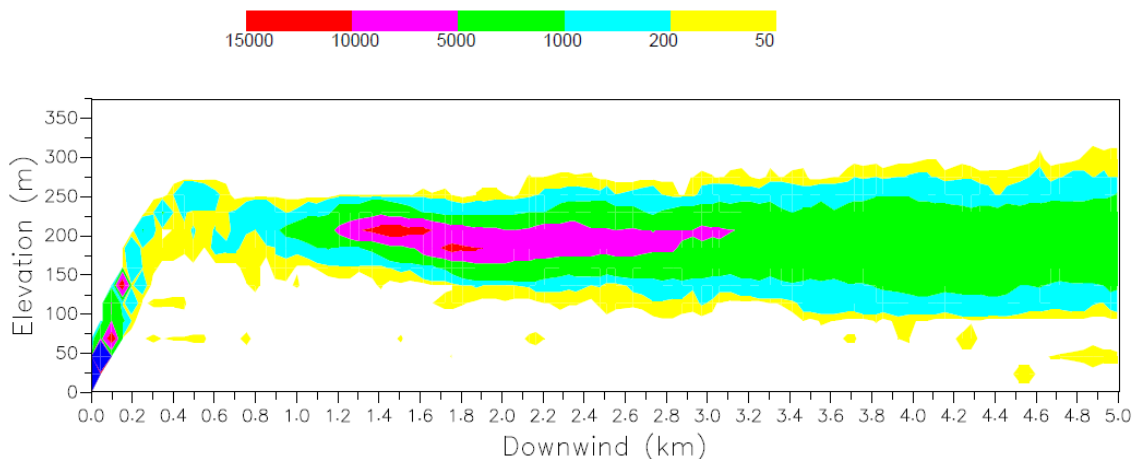
Figura 52. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 53. Concentrazione del monossido di carbonio.





Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 54. Concentrazione dell'anidride carbonica.

Nello scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 40 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200-230 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) si aggira attorno ai valori di 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , fino a circa 3,3 km dall'incendio, dove la concentrazione si abbassa sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un breve picco iniziale di circa 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 1,4 km dal focolare, per poi azzerarsi totalmente entro i 4 km di distanza.

La concentrazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) segue lo stesso andamento, con picchi di concentrazione tra 5000-10000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresentano a circa 1,4 km, per poi abbassarsi sotto i 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 3 km di distanza dal focolare.

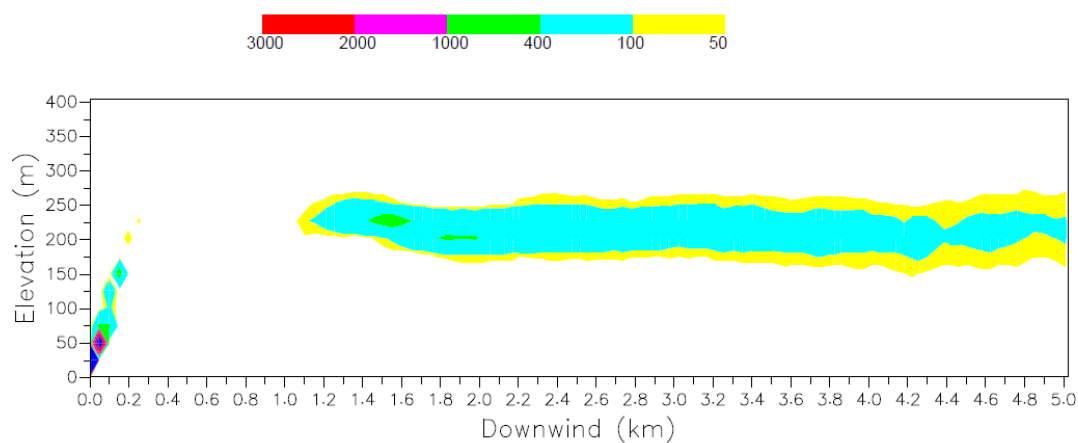
## 7.5 Dispersione effluenti dello Scenario 4

Nella Tabella 21 sono riportati i parametri che variano utilizzati per realizzare le simulazioni.

Tabella 21. Input dello scenario considerato.

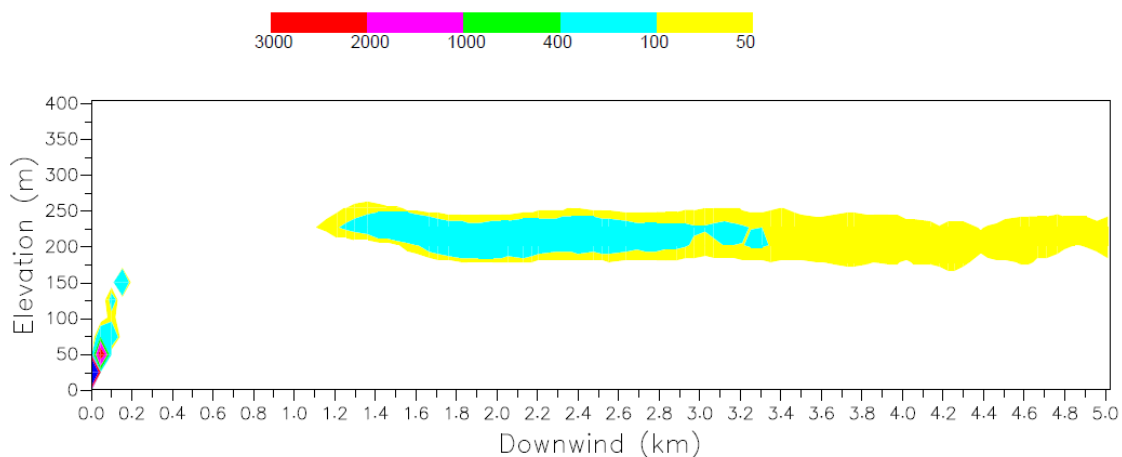
SCENARIO 4	Valori di picco	Valori mediati
Distanza sottovento (km)	5	5
Superficie dei fuochi (m <sup>2</sup> )	25	25
HRR (MW/m <sup>2</sup> )	1.99	1.69
Radiative factor	0.38	0.38
Burning rate per unit area (kg/m <sup>2</sup> *s)	0.0101	0.009
PM10 (g/kg)	92	76
CO <sub>2</sub> (g/kg)	3616	2981
CO (g/kg)	51	42
Vento (m/s)	2.5	2.5
Temperatura superficiale (°C)	20	20
Classe di stabilità	D	D

### Valori di picco



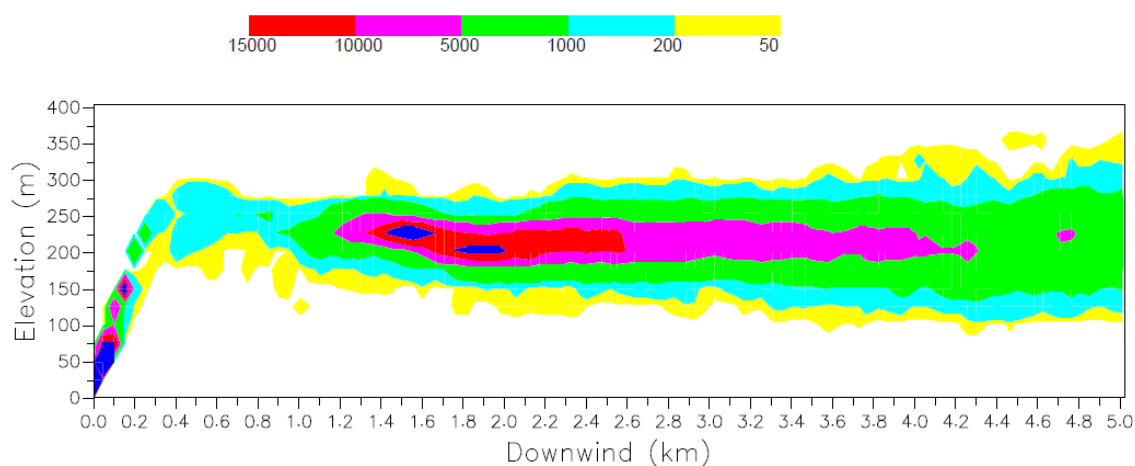
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 55. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 56. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 57. Concentrazione dell'anidride carbonica.

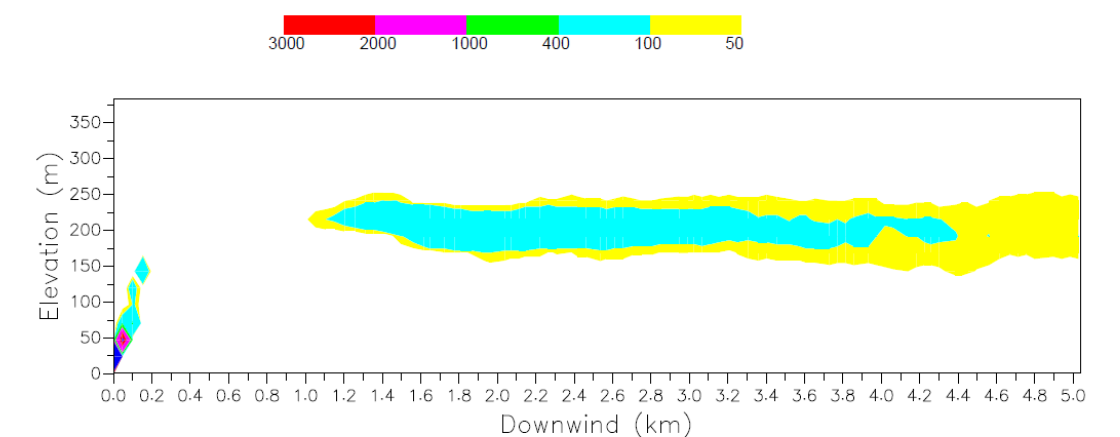
Nel primo scenario analizzato si può immediatamente vedere che l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 50 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intorno ai 200-230 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) supera i valori di  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per tutto il profilo verticale della nube, con alcuni picchi di  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ad una distanza di 1,5 km dall'incendio.

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un picco iniziale superiore ai  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra  $100\text{-}400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 3,2 km dal focolare.

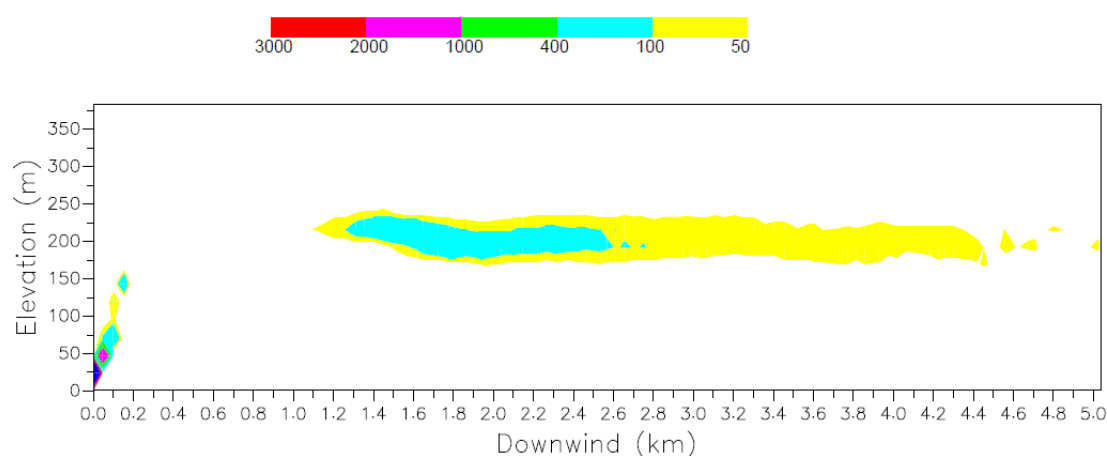
La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con un picco iniziale di concentrazione oltre i  $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresenta nella zona compresa tra 1,5 e 2 km, per poi abbassarsi sotto i  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 4 km di distanza dal fuoco.

## Valori mediati



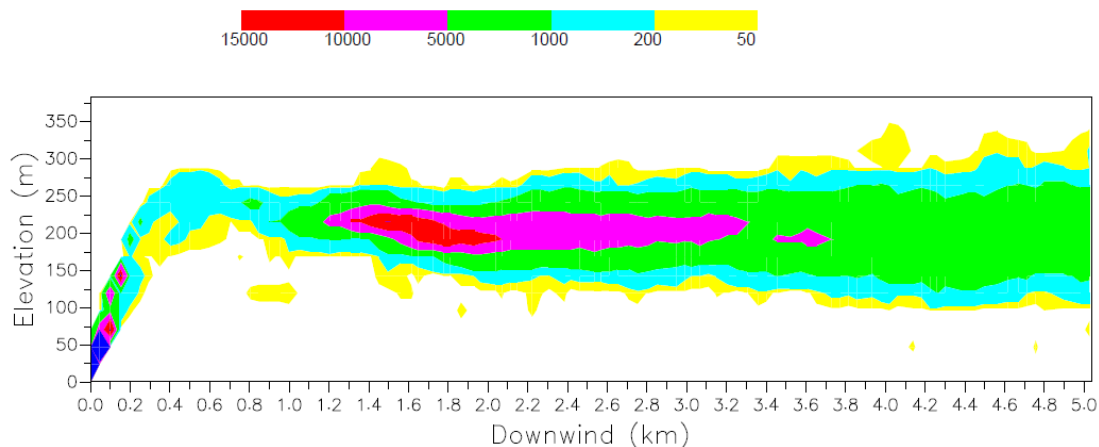
Smoke Particulate PM10 Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 58. Concentrazione del particolato di fumo.



Carbon Monoxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 59. Concentrazione del monossido di carbonio.



Carbon Dioxide Concentration (micrograms/cubic meter - one hr avg) Vertical Plane, 0 km Crosswind

Figura 60. Concentrazione dell'anidride carbonica.

Nello scenario analizzato l'altezza iniziale del pennacchio è di circa 40 metri. La nube cresce in altezza con la distanza, fino a stratificarsi intono ai 200-230 metri di altezza, nella direzione sottovento.

La concentrazione iniziale di particolato di fumo (PM10) si aggira attorno ai valori di 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , successivamente si stabilizza tra i 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , fino a circa 4,4 km dall'incendio, dove la concentrazione si abbassa sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Analogamente, la concentrazione di monossido di carbonio (CO), dopo un breve picco iniziale di circa 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , si stabilizza anch'essa su valori compresi tra 100-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per poi abbassarsi sotto i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ad una distanza di circa 2,5 km dal focolare, per poi azzerarsi totalmente entro i 4,5 km di distanza.

La concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) segue lo stesso andamento, con picchi di concentrazione tra 5000-10000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nella parte iniziale, che si ripresentano a circa 1,4 km, per poi abbassarsi sotto i 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a circa 3,3 km di distanza dal focolare.



# Conclusioni

Pur essendo un combustibile la plastica stessa, per il lavoro svolto è stata scelta come combustibile l'etilene in fase gassosa, per innescare la reazione di combustione delle materie plastiche. La composizione del combustibile è stata considerata pura, senza ulteriori gas in miscela, mentre una sostanziale modifica è stata invece eseguita ai parametri predefiniti per indicare i residui della combustione, settandoli sulla media dei tre materiali indagati. Un dettaglio superiore, anche in termini di dinamica della pirolisi, è stato delegato a studi futuri. Per quanto riguarda le balle di plastica, nel primo scenario sono state settate utilizzando la media aritmetica delle proprietà delle 3 differenti specie di polimeri, ossia il PE, il PP ed il PET. Nel terzo e quarto scenario invece, le balle di plastica sono state considerate di materiale omogeneo e pertanto ogni parametro della combustione è stato differenziato. Gli Scenari 1 - 2 e 3 - 4, sono praticamente simili, l'unica differenza è legata al tempo, ossia il tempo di durata dell'incendio. Nello Scenario 1 e nello Scenario 3 è stato considerato un incendio della durata di 10 minuti, negli altri due scenari di 20 minuti.

Confrontando i grafici ottenuti si evidenzia come tutte le concentrazioni delle specie considerate, seguano lo stesso andamento nel tempo:

- 1) nelle fasi iniziali dell'incendio assumono valori prossimi allo zero;
- 2) seguono una fase intermedia crescente più o meno simile;
- 3) finita la fase di crescita, si stabilizzano su un certo valore, che rimane pressoché costante nel tempo, eccetto che per brevi picchi.

Ciò si allinea perfettamente con i parametri di input utilizzati per lo scenario di FDS, in quanto la curva ricavata sperimentalmente da Newmann<sup>[6]</sup>, per incendi di materiale plastico misto, utilizzata come riferimento per la modellazione, segue un andamento simile, stabilizzandosi sui valori di picco all'incirca a 200 secondi dall'inizio della combustione.

Confrontando i dati elaborati delle concentrazioni delle specie emesse invece si può osservare che:

- 1) i valori di picco delle concentrazioni, per gli scenari a 10 e a 20 minuti restano pressoché invariati, con un leggero incremento negli scenari a 20 minuti;

- 2) i valori mediati nel tempo presentano un incremento negli scenari a 20 minuti, rispetto a quelli a 10 minuti, stimabile attorno al 15-20%.
- 1) i risultati delle concentrazioni delle specie ottenute (CO, CO<sub>2</sub> e SOOT), così come della curva di  $HRR(t)$ , risultano poco più che raddoppiati nelle simulazioni che coinvolgono tre pile di plastica invece che una. Tale risultato è legato al fatto che negli scenari che comprendono le pile omogenee, per ognuna sono stati settati parametri differenti, in relazione al materiale associato.
- 2) Nelle simulazioni che coinvolgono più pile di plastica, i valori di *Burning rate*, al contrario, risultano perfettamente triplicati rispetto agli con una sola pila di plastica.

Nelle simulazioni effettuate si sono stati studiati anche i valori delle temperature raggiunte sul piano perpendicolare alla direzione del vento, posto a 10 metri di distanza dal fuoco. Si è osservato subito che, oltre alla ampiezza dell'incendio, anche la durata dello stesso influisce sull'incremento della temperatura nelle immediate vicinanze. In generale, essendo all'aperto, l'incendio non produce notevoli variazioni di temperatura.

A tal proposito si è andato ad indagare il calore irradiato dalle balle di plastica in fiamme, al livello del suolo. I valori maggiori si sono registrati negli scenari che coinvolgevano un numero maggiore di balle di plastica. La durata dell'incendio influisce sull'aumento dei valori di flusso termico in maniera inferiore rispetto alle dimensioni dell'incendio.

Negli impianti, molto spesso si ha a che fare con diversi tipi di rifiuti, macchine e/o materiali che potrebbero essere sensibili a tali incrementi di temperatura o di irraggiamento, pertanto una corretta progettazione antincendio dovrebbe tener conto anche delle distanze di separazione.

Una volta ricavati i dati sulle concentrazioni degli effluenti della combustione, i valori di  $HRR$  e di *Burning rate*, si è proceduto allo studio della dispersione degli effluenti utilizzando il software Aloft, più adatto a questo tipo di modellazione sulle lunghe distanze.

Per ogni scenario sono state effettuate 2 diverse simulazioni, la prima utilizzando i valori di picco delle curve di FDS, la seconda utilizzando i parametri mediati nel tempo. Per ogni simulazione sono andati a ricercarsi l'andamento delle concentrazioni fino alla distanza di 5 km nella direzione del vento di PM10, CO e CO<sub>2</sub>. Ottenendo così così 24 differenti scenari di dispersione degli effluenti, 8 per ogni specie considerata.



Uno dei limiti del software Aloft è quello di dover impostare come superficie minima dei fuochi 25 m<sup>2</sup>. Per ovviare al problema, prima di essere inseriti all'interno del programma, tutti i parametri sono stati calcolati per unità di area.

Le simulazioni di Aloft sono state eseguite considerando una superficie dei fuochi di 25 m<sup>2</sup> e, considerando le dimensioni standard delle balle di materiale plastico compattato, le simulazioni si possono ritenere ben rappresentative di un incendio che coinvolge circa una quindicina di balle di materiale plastico.

Osservando gli andamenti delle dispersioni per il PM10, il CO e la CO<sub>2</sub>, si può osservare che:

- 1) considerando le condizioni standard con il vento 2,5 m/s, le concentrazioni nella nube stratificata iniziano ad abbassarsi solo dopo una distanza notevole dal fronte di fiamma, che in alcuni casi arriva anche a diversi chilometri;
- 2) la durata dell'incendio incide notevolmente sulla produzione di residui di combustione ed inevitabilmente agisce negativamente sulla dispersione degli inquinanti;
- 3) una volta raggiunto il picco del pennacchio, i moti convettivi e le turbolenze create dal calore sviluppato dall'incendio, portano ad un notevole abbassamento delle concentrazioni degli inquinanti ad abbassarsi notevolmente nelle immediate vicinanze dell'incendio, per poi rialzarsi anche a distanza di alcune centinaia di metri.

Proprio su quest'ultimo punto è opportuno soffermarsi, in quanto molto spesso, la permanenza in atmosfera può dar luogo ad effetti differiti nel tempo. Un efficace sistema di gestione dell'emergenza nella fase post incidentale da parte delle Autorità non dovrebbe prescindere da una rapida individuazione non solo dell'estensione spaziale della possibile contaminazione, ma anche dell'effettiva entità del rischio ad essa legata.



## APPENDICE

### A

Eventi di incendio in impianti di trattamento, smaltimento, recupero dei rifiuti verificatisi nel periodo 2014-2017, divisi per regione sul territorio italiano <sup>[2]</sup>.

Provincia	Comune	Azienda	Tipologia di attività	Data
Novara	Barengo	A2A discarica di Barengo	Discarica rifiuti speciali non pericolosi	23 giugno 2015
Biella	Vigliano Biellese	Autodemolizione eredi di Mazzilli Francesco	Autodemolitore	31 agosto 2016
Asti	Sommariva del Bosco	Str società trattamento rifiuti	Tmb e valorizzazione rifiuti da raccolte differenziate	3 luglio 2016
Biella	Biella	Autodemolizione abc	Autodemolitore	27 gennaio 2017
Torino	Castellamonte	Agrigarden ambiente	Trattamento rifiuti urbani	26 maggio 2017
Brescia	Calcinato	Special rifiuti s.r.l.	Stoccaggio rifiuti pericolosi e non, cernita e recupero non pericolosi	3 settembre 2015 16 marzo 2017
Brescia	Bedizzole	Faeco srl (ora Green up)	Discarica	17 marzo 2017 24 maggio 2017 30 maggio 2017
Milano	Bruzzano	Carluccio s.r.l.	Stoccaggio, cernita e recupero rifiuti non pericolosi	24 luglio 2017 2 ottobre 2017
Pavia	Mortara	Eredi Bertè Antonino s.r.l.	Recupero rifiuti non pericolosi e stoccaggio rifiuti pericolosi e non	6 settembre 2017
Vicenza	Cornedo Vicentino	ECO.EL. s.r.l.	Impianto trattamento e/o recupero	14 marzo 2013
Treviso	San Biagio di Callalta	Bigaran s.r.l.	Impianto trattamento rifiuti	26 febbraio 2014
Padova	Sant'Angelo di Piove di Sacco	Intercommercio di Coccarielli Guerrino & C snc	Impianto di recupero	21 marzo 2015
Treviso	Castelfranco Veneto	Ceccato	Impianto trattamento recupero	26 settembre 2015
Treviso	Mogliano Veneto	Veritas spa		17 settembre 2016
Padova	Monselice	Nek s.r.l.		4 ottobre 2016

<b>Provincia</b>	<b>Comune</b>	<b>Azienda</b>	<b>Tipologia di attività</b>	<b>Data</b>
Vicenza	Rossano Veneto	Fiorese Ecologia s.r.l.	Stoccaggio, raccolta e trasformazione di rifiuti speciali e tossico nocivi	25 marzo 2017
Vicenza	Torrebelvicino	Vallortigara servizi ambientali S.p.a.	Stoccaggio, raccolta e trasformazione di rifiuti speciali e tossico nocivi	25 marzo 2017
Treviso	Vidor	Vidori servizi ambientali S.p.a.	Gestione e trattamento di rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi	17 agosto 2017
Bolzano	Bolzano	Eco-center s.p.a. - termovalorizzatore di Bolzano	Triturazione di rifiuti ingombranti	11 settembre 2014
Trento	Lavis	Ricicla Trentino 2 srl	Rifiuti urbani e rifiuti speciali non pericolosi	5 agosto 2015
Trento	Faedo	Autodemolizioni Dallago	Recupero dei materiali e rottamazione di veicoli a motore e rimorchi	14 dicembre 2016
Pordenone	Aviano	Snua srl	Rifiuti urbani	16 dicembre 2014
Pordenone	Spilimbergo	Mistral s.r.l.	Rifiuti sanitari	29 luglio 2015
Savona	Cisano sul Neva	S.a.r.r. Srl	Recupero rifiuti non pericolosi	4 settembre 2014 19 febbraio 2017 6 giugno 2017
Genova	Genova	F.i.d.eco S.r.l.	Stoccaggio e recupero rifiuti speciali e pericolosi	15 aprile 2016
Savona	Stella	Comet recycling srl	Smaltimento e recupero rottami, rifiuti da demolizione e non pericolosi	18 aprile 2016
La Spezia	Follo	Ferdeghini s.a.s.	Stoccaggio, selezione e cernita con recupero di rifiuti industriali non pericolosi	16 aprile 2017
Bologna	Sant'Agata Bolognese	Herambiente spa	Impianto di compostaggio	17 gennaio 2014
Reggio Emilia	Cadelbosco di Sopra	Idealservice	Servizio pulizia	ottobre 2015
Reggio Emilia	Novellara	S.a.ba.r. s.p.a.	Gestione rifiuti	aprile 2015
Bologna	Zola Predosa	Zola Predosa teleriscaldamento s.r.l.	Impianto di recupero	17 maggio 2015
Bologna	Granarolo Emilia	Herambiente s.p.a.	Selezione e recupero	29 luglio 2016
Piacenza	Piacenza	Inceneritore comunale	Inceneritore	31 agosto 2016

<b>Provincia</b>	<b>Comune</b>	<b>Azienda</b>	<b>Tipologia di attività</b>	<b>Data</b>
Ravenna	Ravenna	Herambiente s.p.a.	Centro stoccaggio	1 luglio 2017
Livorno	Rosignano Marittimo	Rea	Rifiuti urbani e speciali non pericolosi	04 aprile 2014 13 aprile 2014
Empoli	Empoli	Mazzoni Ferro Srl	Recupero e messa in riserva di rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi	3 luglio 2014
Pisa	Pontedera	Mansider	Impianto demolizione rifiuti metalli ci pericolosi e non pericolosi	27 maggio 2015
Livorno	Livorno	Ra.ri s.r.l.	Gestione rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi	03 marzo 2015
Livorno	Piombino	Asiu s.p.a.	Rifiuti non pericolosi	21 luglio 2015 11 settembre 2015
Livorno	Livorno	Lonzi metalli	Stoccaggio e trattamento rifiuti pericolosi e non pericolosi	08 agosto 2015
Livorno	Livorno	Trend livorno s.p.a.	Recupero raee	11 settembre 2015
Pisa	Ponsacco	Ferretti Autodemolizioni	Gestione rifiuti pericolosi e non pericolosi	17 marzo 2016
Pistoia	Serravalle Pistoiese	Pistoiamambiente	Rifiuti speciali non pericolosi	4 luglio 2016
Pisa	Castelfranco di Sotto	Waste Recycling	Gestione rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi	10 settembre 2016
Pistoia	San Marcello Pistoiese	Sistemi biologici s.r.l.	Compostaggio	12 maggio 2017 19 giugno 2017
Fermo	Torre San Patrizio località San Pietro	Ditta s.a.m.	Discarica di rifiuti non pericolosi	23 luglio 2014 30 luglio 2016
Macerata	Montecassiano	Giustozzi ambiente srl	Rifiuti speciali pericolosi	9 luglio 2015
Macerata	Tolentino	Cosmari	RSU	09 luglio 2015
Terni	Narni	Ternienergia spa	Recupero di pneumatici fuori uso	24 ottobre 2014 18 luglio 2015
Terni	Orvieto	Discarica Rsu di Le Crete	Discarica	15 luglio 2017
Viterbo	Viterbo	Trattamento rifiuti ecologia	Tmb	31 maggio 2014

<b>Provincia</b>	<b>Comune</b>	<b>Azienda</b>	<b>Tipologia di attività</b>	<b>Data</b>
Roma	Colleferro	Lazio ambiente spa	Discarica	11 giugno 2014
Latina	Aprilia	Kyklos	Rifiuti organici	1 novembre 2014
Roma	Albano Laziale	Pontina ambiente	TMB rifiuti solidi urbani	30 giugno 2016
Viterbo	Onano	Cite	Trattamento e stoccaggio rifiuti	3 settembre 2016
Rieti	Cittaducale	Ternipolimeri	Rifiuti plastici	4 dicembre 2016
Roma	Pomezia	Ecoservizi per l'ambiente	Trattamento rifiuti speciali non pericolosi	7 maggio 2017
Teramo	Scerne di Pineto	AM Consorzio ambiente	Selezione rifiuti	16 novembre 2016
Isernia	Pozzilli-Venafro	Smaltimenti Sud s.r.l.	Selezione dei rifiuti derivanti dalla raccolta differenziata	3 settembre 2015
Avellino	Montefredane	Novolegno spa	Recupero di materia ed energetico	11 giugno 2014
Caserta	Villa Literno	Polo Nautico	Falegnameria	15 ottobre 2014
Caserta	Caserta	Campo nomadi	Rifiuti campo nomadi	11 novembre 2014
Caserta	Santa Maria Capua Vetere	Sponda destra canale Regi Lagni		21 agosto 2015
Avellino	Atripalda	C.e.r. v.u. s.r.l	Autodemolizione	12 giugno 2016
Napoli	Tufino	Discarica Paenzano 2	Discarica	26 agosto 2016
Caserta	Marcianise	Sud Asi	Deposito incontrollato	30 agosto 2016
Bari	Giovinazzo	Discarica	Discarica	4 agosto 2015
Lecce	Lecce	Recycling srl	Trattamento rifiuti	19 novembre 2015
Foggia	Foggia	Terreno agricolo	Capannone e serre dismesse	24 maggio 2017
Bari	Giovinazzo	Discarica	Discarica	23 agosto 2016
Crotone	Cutro	Pentabloc	Deposito pneumatici usati	27 giugno 2015
Crotone	Cirò Marina	Ecoemme srl	Riciclaggio di materie plastiche	8 luglio 2015
Crotone	San Mauro Marchesato	Rocca s.r.l.	Impianto di trattamento rifiuti	24 novembre 2016
Reggio Calabria	Gioia Tauro	Eco.ra.d.	Raccolta differenziata rifiuti non pericolosi	8 agosto 2017
Reggio Calabria	Gioia Tauro	Ecoservizi s.r.l.	Trasformazione e smaltimento di rottami ferrosi	14 ottobre 2017
Palermo	Palermo	Discarica Rsu di Bellolampo	Rifiuti solidi urbani	7 luglio 2015
Caltanissetta	Gela	Discarica dismessa C.da Cipollina	Rifiuti solidi urbani	15 agosto 2015

<b>Provincia</b>	<b>Comune</b>	<b>Azienda</b>	<b>Tipologia di attività</b>	<b>Data</b>
Palermo	Palermo	F.lli Montalto - centro di rottamazione	Deposito di mezzi da rottamare previa bonifica e di materiali e parti di veicoli.	24 maggio 2016
Agrigento	Aragona - Favara	Società Progeo srl	Raccolta differenziata della frazione secca dei rifiuti urbani	26 giugno 2016
Palermo	Caltavuturo	Discarica di Caltavuturo	Rifiuti solidi urbani	19 ottobre 2016
Palermo	Carini	Ecofarma srl	Incenerimento rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi	22 marzo 2017
Messina	Messina	Messinambiente spa in liquidazione	Recupero rifiuti non pericolosi	18 aprile 2017
Palermo	Carini	Sidermetal s.r.l.	Triturazione dei rifiuti	2 maggio 2017
Siracusa	Melilli	Discarica Andolina	Rifiuti speciali	9 giugno 2017
Olbia - Tempio	Tempio Pausania	Unione Comuni Alta Gallura	Discarica rifiuti solidi urbani	7 novembre 2014
Cagliari	Quartucciu	Ri.me.fe	Autodemolizione	18 maggio 2015
Oristano	Arborea	Consorzio Industriale Provinciale Oristanese	Trattamento rifiuti solidi urbani	1 agosto 2015
Sud Sardegna	Serramanna	Cisa service	Compostaggio e depurazione	12 luglio 2016
Olbia – Tempio	Olbia	Cipnes, Spiritu Santu	Impianto di compostaggio	20 agosto 2016
Oristano	Arborea	Consorzio Industriale Provinciale Oristanese	Trattamento rifiuti solidi urbani	21 ottobre 2016
Sassari	Sassari	Siged	Discarica RSU	28 giugno 2014
Sassari	Chilivani – Ozieri	Secit	Impianto compostaggio	15 luglio 2014
Sassari	Sassari	Riccoboni	Discarica RSU	18 maggio 2015 29 maggio 2016
Sassari	Alghero	Ecopramal srl	Recupero e trattamento di rifiuti speciali non pericolosi	28 marzo 2016
Sassari			Discarica dismessa di inerti	27 febbraio 2017
Cagliari	Capoterra	Tecnocasic	Trattamento rifiuti solidi urbani, pericolosi e acque reflue urbane e domestiche	30 aprile 2017

Provincia	Comune	Azienda	Tipologia di attività	Data
Sud Sardegna	Villacidro	Villaservice s.p.a.	Smaltimento rifiuti solidi	14 giugno 2017
Olbia - Tempio	Olbia	Cipnes Spiritu Santu	Impianto di compostaggio	26 giugno 2017
Cagliari	Capoterra	Tecnocasic	Trattamento rifiuti solidi urbani, pericolosi e acque reflue urbane e domestiche	23 giugno 2017
Sassari	Villacidro	Villaservice spa	Smaltimento rifiuti solidi	14 giugno 2017 21 luglio 2016 28 agosto 2017

## **B.1**

```

&HEAD CHID='deposito_rifiuti', TITLE=' Incendio di 1 balla di plastica
mista compattata, durata 10 min' /

&MESH IJK=100,100,50, XB=0.,100.,0.,100.,0.,50. /

&TIME T_BEGIN=-5., T_END=600. /

&WIND SPEED=2.5, DIRECTION=270., Z_0=0.1, L=1000000., Z_REF=10. /

&OBST XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='mix plastica', /

&MATL ID='mix plastica', DENSITY=1050., CONDUCTIVITY = 0.273,
SPECIFIC_HEAT = 2.73/

&SURF ID='mix plastica', COLOR='BLACK', HRRPUA=450., TAU_Q=210.,
MATL_ID ='mix plastica', THICKNESS=0.1, BURN_AWAY=.TRUE./

&DUMP SMOKE3D=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE. /

&REAC FUEL='ETHYLENE', FYI='C_2 H_4', CO_YIELD=0.039, SOOT_YIELD=0.07/

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&SLCF PBX=60., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /

```



```

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='rad' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='con' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&TAIL /

```

## **B.2**

```

&HEAD CHID='deposito_rifiuti', TITLE=' Incendio di 1 balla di plastica
mista compattata, durata 20 min' /

&MESH IJK=100,100,50, XB=0.,100.,0.,100.,0.,50. /

&TIME T_BEGIN=-5., T_END=600. /

&WIND SPEED=2.5, DIRECTION=270., Z_0=0.1, L=1000000., Z_REF=10. /

&OBST XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='mix plastica', /

&MATL ID='mix plastica', DENSITY=1050., CONDUCTIVITY = 0.273,
SPECIFIC_HEAT = 2.73/

&SURF ID='mix plastica', COLOR='BLACK', HRRPUA=450., TAU_Q=210.,
MATL_ID= 'mix plastica', THICKNESS=0.1, BURN_AWAY=.TRUE./

&DUMP SMOKE3D=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE. /

&REAC FUEL='ETHYLENE', FYI='C_2 H_4', CO_YIELD=0.039, SOOT_YIELD=0.07/

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&SLCF PBX=60., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE',
IOR=-2, ID='burn' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='rad' /

```

```

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='con' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&TAIL /

```

### **B.3**

```

&HEAD CHID='deposito_rifiuti', TITLE=' incendio 3 balle di materiale
omogeneo, durata 10 min' /

&MESH IJK=100,100,50, XB=0.,100.,0.,100.,0.,50. /

&TIME T_BEGIN=-5., T_END=600. /

&WIND SPEED=2.5, DIRECTION=270., Z_0=0.1, L=1000000., Z_REF=10. /

&OBST XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PE', /

&OBST XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PET', /

&OBST XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PP', /

&MATL ID='PE', DENSITY=860., CONDUCTIVITY = 0.29, SPECIFIC_HEAT = 3.5 /

&SURF ID='PE', COLOR='BLACK', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PE',
THICKNESS=0.1,BURN_AWAY=.TRUE. /

&MATL ID='PET', DENSITY=1380., CONDUCTIVITY = 0.29,SPECIFIC_HEAT = 2.01 /

&SURF ID='PET', COLOR='ORANGE', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PET',
THICKNESS=0.1,BURN_AWAY=.TRUE. /

&MATL ID='PP', DENSITY=910., CONDUCTIVITY = 0.24, SPECIFIC_HEAT = 2.68 /

&SURF ID='PP', COLOR='BLUE', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PP',
THICKNESS=0.1,BURN_AWAY=.TRUE. /

&DUMP SMOKE3D=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE. /

&REAC FUEL='ETHYLENE', FYI='C_2 H_4', CO_YIELD=0.039, SOOT_YIELD=0.07/

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /

```

```

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&SLCF PBX=60., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='rad' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='con' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='rad' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='con' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='rad' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='con' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY', SPEC_ID='ETHYLENE',
STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&TAIL /

```

## **B.4**

```

&HEAD CHID='deposito_rifiuti', TITLE=' incendio 3 balle di materiale
omogeneo, durata 20 min' /

&MESH IJK=100,100,50, XB=0.,100.,0.,100.,0.,50. /

&TIME T_BEGIN=-5., T_END=600. /

&WIND SPEED=2.5, DIRECTION=270., Z_0=0.1, L=1000000., Z_REF=10. /

&OBST XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PE', /

```

```

&OBST XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PET', /
&OBST XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., SURF_ID='PP', /
&MATL ID='PE', DENSITY=860., CONDUCTIVITY = 0.29, SPECIFIC_HEAT = 3.5 /
&SURF ID='PE', COLOR='BLACK', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PE',
THICKNESS=0.1,BURN_AWAY=.TRUE. /
&MATL ID='PET', DENSITY=1380., CONDUCTIVITY = 0.29,SPECIFIC_HEAT = 2.01 /
&SURF ID='PET', COLOR='ORANGE', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PET',
THICKNESS=0.1, BURN_AWAY=.TRUE. /
&MATL ID='PP', DENSITY=910., CONDUCTIVITY = 0.24, SPECIFIC_HEAT = 2.68 /
&SURF ID='PP', COLOR='BLUE', HRRPUA=450., TAU_Q=200., MATL_ID= 'PP',
THICKNESS=0.1,BURN_AWAY=.TRUE. /
&DUMP SMOKE3D=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE. /
&REAC FUEL='ETHYLENE', FYI='C_2 H_4', CO_YIELD=0.039, SOOT_YIELD=0.07/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /
&SLCF PBX=60., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /
&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /
&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='rad' /
&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',
IOR=-2, ID='con' /
&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /
&DEVC XB=48.5,49.5,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/
&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /
&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='rad' /

```

```

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='con' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=47.,48.,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY',
SPEC_ID='ETHYLENE', STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='BURNING RATE', IOR=-2,
ID='burn' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='rad' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX',IOR=-2,
ID='con' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='gas' /

&DEVC XB=51,52,49.5,51.1,0.,1., QUANTITY = 'DENSITY', SPEC_ID='ETHYLENE',
STATISTICS = 'VOLUME INTEGRAL' ID = 'Mass fuel'/

&TAIL /

```



# Bibliografia

## Indice bibliografico.

1. Annuario dei dati ambientali 2018 – ISPRA, **Rifiuti** (coordinatore tematico Andrea Massimiliano LANZ, Rosanna LARAIA, coordinatore statistico Cristina FRIZZA).
2. Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati - **Il fenomeno degli incendi negli impianti di trattamento e smaltimento di rifiuti.**
3. Circolare ministeriale (marzo 2018). **Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi.**
4. Pierpaolo - Presidente nazionale dell'A.T.Is.A. (Associazione Tecnica Ispettori Antincendio) - **I processi di combustione ed i prodotti della combustione.**
5. APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici - **Diossine Furani e PCB.**
6. Morgan J. Hurley, Daniel Gottuk, John R. Hall Jr., Kazunori Harada, Erica Kuligowski, Milosh Puchovsky, Jose' L. Torero, John M. Watts Jr., Christopher J. Wieczorek - **SFPE Handbook of Fire Protection.**
7. Newman, J., and Troup, J. M. A., **The Building Calorimeter: FM Global's Novel Approach to Large-Scale Fire Testing**, NFPA World Safety Conf. and Expo., Las Vegas (2005).
8. ARPA Lazio - **Il monitoraggio ambientale a seguito di incendi nel Lazio** (gennaio 2014 – giugno 2017).
9. Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vanella - **Fire Dynamics Simulator User's Guide.**
10. NIST Special Publication 935, **In Situ Burning of Oil Spills Workshop Proceedings**, New Orleans, Louisiana, November 2-4, 1998.

## **Siti web**

<https://eur-lex.europa.eu>

<http://www.isprambiente.gov.it/it>

<https://www.ilsole24ore.com>

<https://www.arpae.it>

<https://www.corepla.it>

<https://www.conip.it>

<https://www.polieco.it>

<https://www.polimerica.it>

<https://www.plasticseurope.com>

<http://atlanteeolico.rse-web.it/>

<https://www.fse-italia.eu>